



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODELOVÁNÍ A SIMULACE ELEKTROMECHANICKÝCH PŘECHODNÝCH JEVŮ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

MODELLING AND SIMULATIONS OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENTS IN ELECTRICAL POWER
SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivan Gromotovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Koudelka

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ivan Gromotovič

ID: 186072

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Modelování a simulace elektromechanických přechodných jevů v elektrizační soustavě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přechodné děje a stabilita elektrizační soustavy - základní rozdělení a klasifikace
2. Úhlová stabilita elektrizační soustavy, činitele ovlivňující stabilitu, stabilita ve víceúrovňové soustavě
3. Dynamický model pro simulaci přechodných dějů - popis, vytvoření modelu v simulačním programu
4. Analýza vlivu různých činitelů na úhlovou (dynamickou) stabilitu - dynamické simulace a jejich vyhodnocení
5. Úhlová stabilita (dynamická) ve víceúrovňové soustavě - dynamické simulace a jejich vyhodnocení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jan Koudelka

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

GROMOTOVIČ, Ivan. *Modelování a simulace elektromechanických přechodných jevů v elektrizační soustavě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2020. 60 s. Vedoucí práce Jan Koudelka.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování a simulace elektromechanických přechodných jevů v elektrizační soustavě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“.

V Brně dne: 1. 6. 2020

.....

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou vyhodnocování přechodné stability v simulačním programu PSCAD. Na jednostrojovém modelu SMIB byly analyzovány činitele ovlivňující přechodnou stabilitu. Výsledky této analýzy potvrdily teoretický předpoklad, že pro přesnější výsledky analýzy přechodné stability je nutné zmiňované činitele uvažovat. Na testovacím modelu IEEE9 byl simulován zkrat a následně byly pomocí různých metod sledovány zátěžné úhly generátorů. Jako vhodnější metoda pro posuzování vzájemných zátěžných úhlů se z výsledků analýzy ukázala metoda reference největšího generátoru v soustavě.

KLÍČOVÁ SLOVA: PSCAD, IEEE9 bus system, přechodná stabilita, SMIB, zátěžný úhel

ABSTRACT

This work deals with the issue of evaluating transient stability in the simulation program PSCAD. Factors affecting transient stability were analyzed on a single-machine SMIB model. The results of this analysis confirmed the theoretical assumption that for more accurate results of the analysis of transient stability, it is necessary to consider the mentioned factors. A short circuit was simulated on the IEEE9 test model and subsequently the load angles of the generators were monitored using various methods. The method of reference of the largest generator in the system proved to be a more suitable method for the assessment of relative load angles from the results of the analysis.

KEY WORDS: PSCAD, IEEE9 bus system, transient stability, SMIB, load angle

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	11
1 Stabilita elektrizační soustavy	14
1.1 Klasifikace stability elektrizační soustavy	14
1.2 Přechodná stabilita ES	15
1.3 Způsob posuzování přechodné stability	16
1.4 Činitele ovlivňující přechodnou stabilitu	18
1.4.1 Regulátor buzení	19
1.4.2 Systémový stabilizátor	20
1.4.3 Regulace otáček hnacích strojů	20
1.4.4 Proměnná vzduchová mezera	21
1.4.5 Druh zkratu	22
1.4.6 Rezistance	23
1.5 Stabilita vícestrojové soustavy	23
2 Modelování přechodné stability v simulačních programech	27
2.1 Vedení	27
2.2 Transformátor	27
2.3 Zátěž	28
2.4 Prvky elektrárenského bloku	29
2.4.1 Synchronní generátor	29
2.4.2 Budicí systém	31
2.4.3 Systémový stabilizátor	31
2.4.4 Regulátor otáček	32
2.5 Modelování synchronního generátoru v PSCADu	32
2.5.1 Parametrizace modelu	32
2.5.2 Rozhraní modelu	32
2.5.3 Inicializace modelu generátoru	34
2.6 Simulování činitelů v programu PSCAD	34
3 Model Single Machine - Infinite Bus	36
3.1 Představení modelu	36
3.2 Modelování buzení	36
3.3 Systémový stabilizátor	37
3.4 Pohon a regulace otáček	38
3.5 Synchronní generátor	39
3.6 Tvrdá síť	39
4 Simulace činitelů	40
4.1 Testovací scénář	40
4.2 Průběhy otáček	41

4.3	Vyhodnocení průběhů	42
5	Vícestrojový model IEEE9	43
5.1	Refereční model	43
5.2	Modelování synchronního generátoru	43
5.3	Modelování buzení	44
5.4	Modelování turbíny a regulátoru otáček	45
5.5	Modelování vedení	46
5.6	Modelování transformátoru	46
6	Simulace přechodné stability ve vícestrojové soustavě	47
6.1	Testovací scénář	47
6.2	Průběhy vzájemných zátěžných úhlů	47
6.3	Vyhodnocení průběhů	48
	Použitá literatura	51
	Seznam příloh	54
A	Validace modelu	55
A.1	1. testovací scénář	55
A.2	2. testovací scénář	55
A.3	3. testovací scénář	56
B	Hodnoty pro IEEE9	58

Seznam obrázků

1.1	Rozdělení přechodných jevů [3]	14
1.2	Základní členění stability ES [2]	16
1.3	Schéma jednostrojového modelu generátor - tvrdá síť [2]	17
1.4	Náhradní schéma jednostrojového modelu generátor - tvrdá síť [2]	17
1.5	Výkonová charakteristika [2]	17
1.6	Průběh výkonových charakteristik v případě výpadku vedení	18
1.7	Vliv regulace buzení na výkonovou charakteristiku	19
1.8	Vliv regulace otáček turbíny na výkonovou charakteristiku	20
1.9	Závislost výkonu stroje s vyniklými póly na úhlu δ [1]	21
1.10	Akcelerační a brzdící plocha pro stroj s vyniklými póly [1]	21
1.11	Výkonové charakteristiky při různých druzích zkratu [1]	22
1.12	Schéma testovacího systému Omahen 1994 [3]	24
1.13	Průběhy zátěžných úhlů generátorů soustavy Omahen	25
2.1	Model synchronního generátoru v PSCADu	27
2.2	Model transformátoru v programu PSCAD v zapojení Ynyn	28
2.3	Reprezentace modelování zatížení	29
2.4	Blokové schéma elektrárenského bloku [15]	30
2.5	Model synchronního generátoru v PSCADu	33
3.1	Jednopolové schéma testovaného modelu z [7]	36
3.2	Blokové schéma modelu SEXS z dokumentu [7]	37
3.3	Blokové schéma systémového stabilizátoru PSS2A z dokumentu [7]	37
3.4	Blokové schéma systémového stabilizátoru PSS2B [8]	37
3.5	Blokové schéma modelu TGOV1 [7]	38
4.1	Průběhy testovacích scénářů č.1, 2 a 5 z tabulky 4.1	41
4.2	Průběhy testovacích scénářů č.3, 4 a 6 z tabulky 4.1	41
5.1	Schéma sítě IEEE 9 [12]	43
5.2	Blokové schéma modelu buzení DC1A [8]	44
5.3	Blokové schéma modelu regulátoru otáček BPA GG	45
6.1	Průběhy jednotlivých zátěžných úhlů generátorů při zkratu v uzlu 5	47
6.2	Průběhy zátěžných úhlů vztažených ke generátoru 1 při zkratu v uzlu 5	48
6.3	Průběhy zátěžných úhlů vztažených k referenčnímu středu při zkratu v uzlu 5	48
A.1	Porovnání průběhů budícího napětí pro 1. testovací scénář	55
A.2	Porovnání průběhů svorkového napětí pro 1. testovací scénář	55
A.3	Porovnání průběhů mechanického výkonu pro 2. testovací scénář	56
A.4	Porovnání průběhů otáček generátoru 2. testovací scénář	56
A.5	Porovnání průběhů svorkového napětí pro 3. testovací scénář	57
A.6	Porovnání průběhů otáček generátoru pro 3. testovací scénář	57

Seznam tabulek

2.1	Ekvivaletní výpis parametrů pro model transformátoru v programu PSCAD . . .	28
2.2	Ekvivalentní výpis parametrů pro model zátěže	29
2.3	Hodnoty generátorů [7]	31
2.4	Výpis veličin pro synchronní stroj [7]	32
3.1	Parametry modelu regulátoru otáček podle [21]	38
3.2	Parametry modelu turbíny podle [21]	38
3.3	Výpis veličin pro synchronní stroj [7]	39
3.4	Parametry modelu regulátoru otáček podle [7]	39
4.1	Testovací případy pro uvedenou úlohu [16]	40
4.2	Výpis veličin pro synchronní stroj [7]	40
5.1	Load flow modelu IEEE9 dle [23]	44
5.2	Zadané parametry modelů budícího systému pro model IEEE9	45
5.3	Hodnoty synchronního stroje s vyniklými póly 2.testovacího scénáře	45
5.4	Ekvivaletní zobrazení veličin pro model vedení v programu PSCAD	46
B.1	Hodnoty generátorů [23]	58
B.2	Hodnoty modelu buzení [24]	59
B.3	Hodnoty modelu regulátoru otáček [23]	59
B.4	Hodnoty parametrů vedení modelu IEEE9 dle [23]	60
B.5	Parametry modelu zatížení [23]	60

Seznam veličin

Veličina	Název	Jednotka
a	Koeficient závislosti činného výkonu na napětí	-
b	Koeficient závislosti jalového výkonu na napětí	-
$\cos\varphi_n$	Jmenovitý účinník	-
df	Odchylka frekvence	-
f	Frekvence	Hz
p_m	Mechanický výkon turbíny	p.u.
r_a	Odpor vinutí kotvy	p.u.
x_d	Synchronní reaktance v podélné ose	p.u.
x'_d	Přechodná reaktance v podélné ose	p.u.
x''_d	Rázová reaktance v podélné ose	p.u.
x_l	Potierova reaktance	p.u.
x_q	Synchronní reaktance v příčné ose	p.u.
x'_q	Přechodná reaktance v příčné ose	p.u.
x''_q	Rázová reaktance v příčné ose	p.u.
K_a	Zesílení regulátoru buzení	p.u.
K_e	Samobuzení	p.u.
K_f	Zesílení stabilizačního obvodu regulátoru	p.u.
K_{Pf}	Koeficient závislosti činného výkonu na frekvenci	Hz ⁻¹
K_{Qf}	Koeficient závislosti jalového výkonu na frekvenci	Hz ⁻¹
D	Koeficient tlumení	p.u.
P	Činný výkon	W
P_0	Zadaná hodnota činného výkonu	W
Q	Jalový výkon	VA _r
Q_0	Zadaná hodnota jalového výkonu	VA _r
R	Statika	p.u.
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	MVA
T_a	Časová konstanta regulátoru buzení	s
T'_{d0}	Přechodná časová konstanta v podélné ose	s
T''_{d0}	Rázová časová konstanta v podélné ose	s
T_e	Časová konstanta budiče	s
T_f	Časová konstanta stabilizačního obvodu regulátoru	s
T'_{q0}	Přechodná časová konstanta v příčné ose	s
T''_{q0}	Rázová časová konstanta v příčné ose	s
T_r	Časová konstanta vstupního filtru regulátoru	s
T_1	Časová konstanta regulátoru	s
T_2	Časová konstanta řídicího ventilu	s
T_3	Časová konstanta servopohonu	s
T_4	Časová konstanta nádoby s parním ventilem	s
T_5	Časová konstanta ohřevu páry	s
U_0	fázová hodnota napětí	kV
U_n	Jmenovité napětí	kV

Veličina	Název	Jednotka
V_{Rmax}	Maximální hodnota výstupu regulátoru	p.u.
V_{Rmin}	Minimální hodnota výstupu regulátoru	p.u.
δ_k	Kritický zátěžný úhel	°
ω_{ref}	Referenční otáčky	p.u.
ΔP_0	Ztráty nakrátko	p.u.
$\Delta\omega$	Odchylka otáček	p.u.
δ	Zátěžný úhel	°
δ_{COI}	Zátěžný úhel referenčního středu	°

Úvod

V dnešní době existují různé simulační programy. Značí se také jako síťové simulátory, které jsou určené k výpočtům přechodných dějů v elektrizační soustavě. Náročnost těchto výpočtů se odvíjí od počtu činitelů, které mohou výsledné řešení výpočtu ovlivnit. Aby se zamezilo komplikovanému řešení výpočtu, uvažují se zjednodušující předpoklady zanedbávající činitele, které nemají významný dopad na řešení. Mohou však nastat případy, kdy určité vlivy nelze zanedbat, a proto je nutné tyto vlivy zahrnout při modelování.

Tato práce si klade za cíl analyzovat přechodnou stabilitu v simulačním programu PSCAD. Na jednostrojovém modelu byla prováděna analýza vlivů vybraných činitelů vyvoláním třífázového zkratu. Na vícestrojovém modelu bylo snahou prověřit různé způsoby měření zátěžných úhlů, kterými se vyhodnocuje případný výpadek generátorů ze synchronismu.

Práce je vymezena do 6 kapitol. První kapitola se zabývá obecným popisem stability elektrizační soustavy, shrnuje vybrané činitele ovlivňující přechodnou stabilitu a přibližuje problematiku přechodné ve vícestrojové soustavě. Druhá kapitola se věnuje . Třetí kapitola shrnuje postup vytvoření jednostrojového modelu vyvedeného do sítě nekonečného výkonu. Čtvrtá kapitola ověřuje vliv činitelů ve vytvořeném modelu z třetí kapitoly. Patá kapitola popisuje postup modelování vícestrojového modelu. Poslední kapitola předvádí dynamické chování vícestrojového modelu při vytvořené poruše.

1 Stabilita elektrizační soustavy

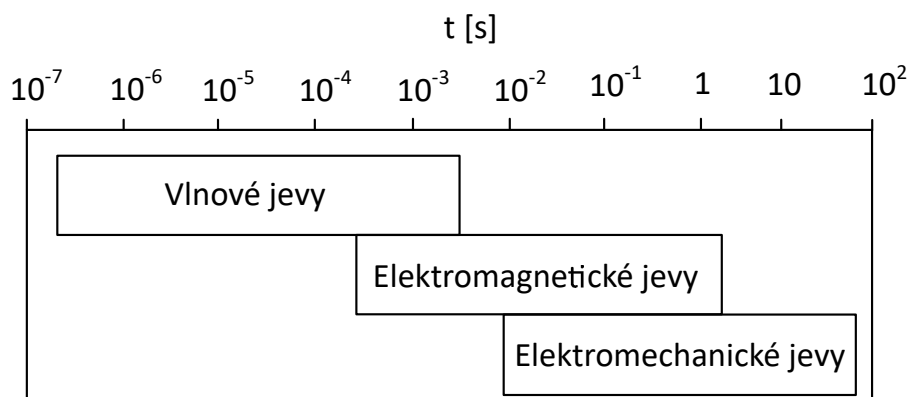
Cílem této kapitoly je představení základní terminologie spjaté se stabilitou elektrizační soustavy, přičemž velký důraz je kladen na přechodnou stabilitu soustavy. Následně jsou popisovány jednotlivé činitele mající vliv na přechodnou stabilitu. V závěru se kapitola věnuje víceúrovňové soustavě a metodice vyhodnování vzájemných zátěžných úhlů.

1.1 Klasifikace stability elektrizační soustavy

Přechodné jevy v elektrizační soustavě (zkráceně ES) vznikají při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do nového ustáleného provozního stavu. Tento přechodný stav v ES může být způsoben manipulacemi prováděnými v ES, změnou zatížení v ES nebo v důsledku poruchy zařízení v ES (zkrat, vypnutí alternátoru ze synchronismu).

Základním provozním stavem dynamického systému je rovnovážný stav, u kterého se nemění stavové veličiny. Pro ustálený stav konkrétně platí, že se nemění základní provozní parametry ES, které určují fyzikální procesy jako je rozdělování energií nebo oteplení článků, tedy efektivní hodnoty proudů a napětí, střední hodnoty výkonů, momenty na hřídeli atd. Právě změnou těchto parametrů nastává přechodný děj.

Hlavním parametrem dělení přechodných jevů je rychlost odeznění přechodného jevu a jakým způsobem konkrétní přechodný děj nastává. Nejrychlejší průběh probíhá u vlnových přechodných jevů, které odezní v řádech mikrosekund až milisekund. Původci vlnových jevů bývají atmosférické přepětí nebo spínací děje. Do druhé skupiny spadají elektromagnetické přechodné jevy odeznívající v řádech desetin sekundy. Do poslední skupiny přechodných jevů spadají elektromechanické přechodné jevy, jejichž čas odeznění se pohybuje mezi desetinami sekundy až po celými minutami. Elektromechanické přechodné jevy jsou v ES charakterizovány především mechanickým pohybem rotorů alternátorů, které podléhají zákonitostmi pohybu rotorů. Grafické rozdělení přechodných dějů probíhacích v ES je pak ilustrováno na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Rozdělení přechodných jevů [3]

Tato práce se zaměřuje na elektromechanické přechodné jevy kvůli vyhodnování úhlové stability. Při matematické analýze přechodných elektromechanických dějů lze v některých případech vycházet ze zjednodušujícího předpokladu, že všechny vlastnosti soustavy jsou lineární, tedy že

charakter dějů probíhající v této soustavě nezávisí na jejich intenzitě. V lineární soustavě se děj vyvolaný dvěma či více nezávislými příčinami může řešit jako součet jednotlivých dějů, z nichž každý je vyvolán jednou příčinou. Chování lineárního systému se popisuje soustavou lineárních diferenciálních a lineárních algebraických rovnic.

Při vyšetřování přechodných elektromechanických dějů je cílem zjistit, zda je soustava stabilní či nikoliv. Stabilita soustavy je schopnost soustavy obnovit původní rovnovážný stav nebo schopnost samostatně zaujmout nový rovnovážný stav při jedné nebo několika změnách provozních parametrů. Soustavu považujeme za staticky stabilní, jestliže po vzniku jakékoliv velmi malé změny provozních parametrů setrvá ve stejném rovnovážném stavu nebo ve stavu velmi blízkém stavu předporuchovému.

Soustava je dynamicky stabilní vzhledem k určité dané konečné změně, jestliže po této změně a po proběhnutí přechodného děje se obnoví rovnovážný stav.

Otázka stability ES se vztahuje k relativním pohybům rotorů synchronních alternátorů oproti sobě. Nastane-li nějaká změna v ES, tak pro stabilitu ES je rozhodující, zda vzájemný pohyb alternátorů, pracujících do této ES, charakterizovaný vzájemným úhlovým rozdílem rotorů různých dvojic alternátorů $\delta_{ik}(t)$, bude omezený či neomezený. V prvním případě se stroje dostanou na jednotnou rychlost a stabilita soustavy zůstane zachována, ve druhém případě některé stroje se budou neustále urychlovat, budou-li odlehčeny nebo se budou zpomalovat, budou-li přetíženy. V takovém případě může u některých strojů v ES dojít k vypadnutí ze synchronismu, kdy může nastat i rozpad soustavy, tj. případ, kdy se alternátory a ostatní části ES rozdělí do dvou a více skupin, přičemž každá z těchto skupin bude mít svou vlastní frekvenci.

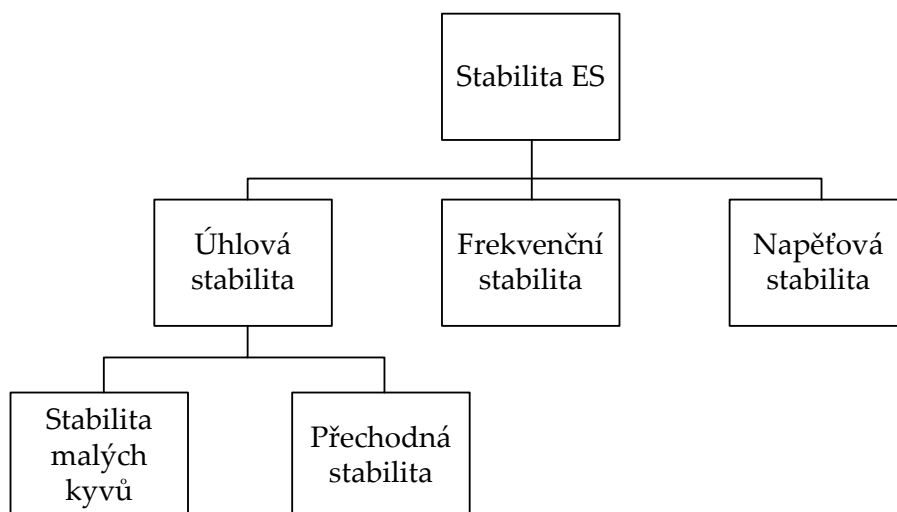
Dobu trvání přechodného elektromechanického děje lze rozdělit do tří intervalů:

- 1. Počáteční stadium, které vzniká během velmi krátké doby po vytvoření poruchy (přibližně 1 s). V tomto intervalu se zahrnuje vznik zkratu, činnost obran a vypínačů, popřípadě i činnost automatiky opětného zapínání (OZ). Během tohoto intervalu nastávají největší změny provozních parametrů ES. Při popisu dynamického chování systému v tomto intervalu se zanedbávají vlivy regulace, tj. regulátory buzení alternátorů, regulátory otáček hnacích strojů a regulaci frekvence ES.
- 2. Střední stadium následuje po počátečním stadiu, přičemž trvá okolo 5 sekund. V tomto stadiu se výrazněji uplatňuje působení regulátorů buzení alternátorů a regulátorů otáček hnacích strojů.
- 3. Poslední stadium trvá zhruba několik minut, ve kterém se uplatňuje působení dalších činitelů v ES jako například regulace frekvence, tepelné časové konstanty páry, vypínání zátěží, výpadek některých alternátorů nebo zásahy obsluhy [1].

1.2 Přechodná stabilita ES

Tato kapitola se zabývá popisem a posuzováním přechodné stability. Dále jsou v této kapitole shrnuty činitele mající vliv na přechodnou stabilitu systému.

Elektrizační soustava se považuje za stabilní, jestliže všechny synchronní stroje zůstávají za všech stanovených podmínek v paralelním chodu a zároveň musí mít ES takové elektrické vlastnosti, aby nedošlo ke ztrátě momentu asynchronních motorů [4]. Jelikož je ES složitý systém reagující na změny zapříčiněné vnitřními a vnějšími vlivy, tak bylo zkoumání stability rozděleno do několika dílčích problémů. Toto rozdělení umožňuje zavést pro tyto problémy předpoklady zjednodušující využití analytických metod. Základní rozdělení ES je představen na obrázku 1.2 [2].



Obr. 1.2: Základní členění stability ES [2]

Úhlová stabilita souvisí s pohybem rotorů synchronních strojů a schopností synchronních strojů zůstat v synchronním provozu se zbytkem propojené soustavy po odeznění přechodného děje. Obecně lze pak vyhodnocovat úhlovou stabilitu na základě způsobeného přechodného děje. Stabilita malých kyvů se zabývá přechodnými ději při malých odchylkách od ustáleného stavu a malých změnách otáček. Přechodná stabilita se zabývá velkými rozruchy při malých změnách otáček, kdy malými změnami otáček se rozumí do 2 % synchronních otáček [1].

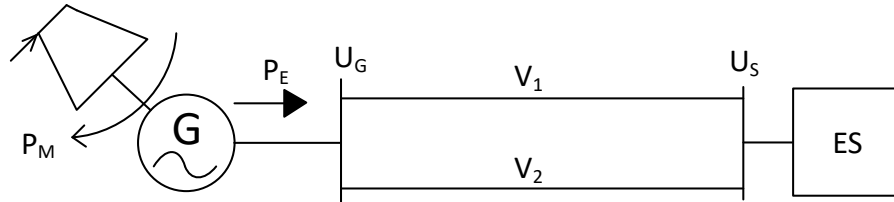
Jak je uvedeno v [2], tak v pojmech týkající se rozdělení úhlové stability nedochází k jednoznačné terminologii. Ve starší literatuře [1] [4] se užívaly pojmy statická a dynamická stabilita. V evropském kontextu pak pojem dynamická stabilita byl užíván pro jinou problematiku než v Severní Americe.

Dle [4] je přechodná stabilita schopnost soustavy se synchronními stroji se vrátit po náhlé poruše znovu do synchronismu. Náhlou poruchou se rozumí skokové změny provozních parametrů ES za malých změn otáček nepřevyšující 2 až 3 % synchronních otáček. Mezi takové poruchy kromě zkratů je také třeba uvažovat náhlé zatížení nebo odlehčení generátorů, nebo třeba také i náhlá změna konfigurace sítě. V kapitole 1.3 je pak vysvětleno vyhodnocování přechodné stability.

1.3 Způsob posuzování přechodné stability

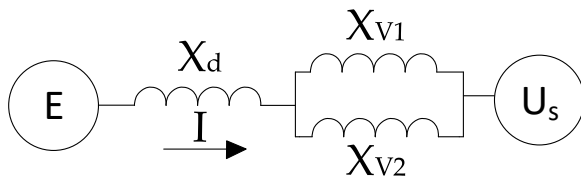
Princip vyhodnocování přechodné stability se obvykle popisuje na jednostrojovém modelu systému synchronní generátor-tvrdá síť vykresleném na obrázku 1.3. Synchronní generátor,

který je poháněný parní turbínou, dodává elektrický výkon P_e přes dvojité vedení o reaktanci X_v do tvrdé sítě charakterizované konstantním napětím U_s . Při zanedbání mechanických a elektrických ztrát je ve výchozím ustáleném stavu elektrický výkon P_e roven mechanickému výkonu turbíny P_m .

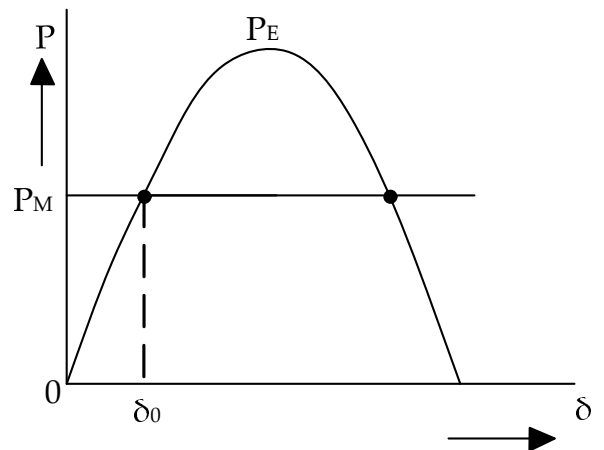


Obr. 1.3: Schéma jednostrojového modelu generátor - tvrdá síť [2]

Na obrázku 1.4 je pak tento model zakreslen v náhradním schématu, kdy synchronní generátor lze nahradit elektromotorickým napětím E a synchronní reaktancí X_d a u vedení se pro zjednodušení uvažuje pouze její reaktance X_v .



Obr. 1.4: Náhradní schéma jednostrojového modelu generátor - tvrdá síť [2]



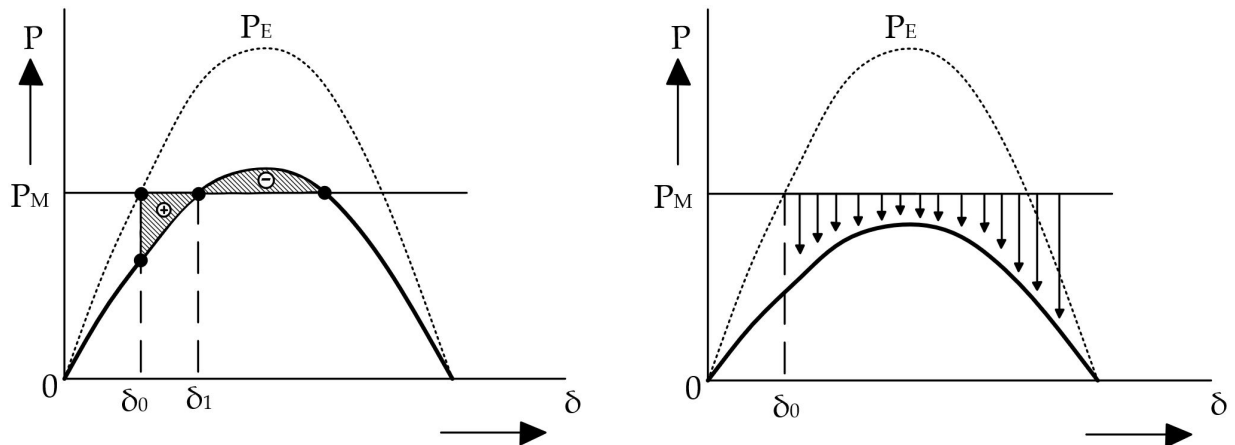
Obr. 1.5: Výkonová charakteristika [2]

Hodnota činného elektrického výkonu vyráběného synchronním generátorem vyvedeným přes vedení do sítě se určí dle vztahu:

$$P_E = 3 \cdot \frac{E \cdot U_s}{X_\Sigma} \cdot \sin \delta \quad (1.1)$$

kde X_Σ je sumární reaktance a δ se nazývá zátěžný úhel vyjadřující fázový posuv mezi elektromotorickým napětím E a napětím sítě U_s . Průběh výkonové charakteristiky ve tvaru sinusovky je znázorněn na obrázku 1.5. První průsečík mechanického výkonu P_M a činného elektrického výkonu P_E určuje stabilní pracovní bod systému.

Pokud z výchozího stavu v modelu 1.3 dojde k výpadku jednoho z paralelních vedení, nastává přechodný děj, který ilustrují výkonové charakteristiky na obrázku 1.6.



(a) Stabilní přechod

(b) Nestabilní přechod

Obr. 1.6: Průběh výkonových charakteristik v případě výpadku vedení

V případě dostatečně malé reaktance vedení oproti synchronní reaktanci nastává stabilní přechodný děj zobrazený na obrázku 1.6a. Tečkovaná výkonová charakteristika před výpadkem vedení se skokově změní na novou charakteristiku značenou plnou čarou. Zátěžný úhel δ se změní podle pohybové rovnice:

$$\frac{T_M}{\omega_{MS}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_M - M_E \approx P_M - P_E \quad (1.2)$$

kde T_M je mechanická časová konstanta spočtená z momentu setrvačnosti soustrojí a ω_{MS} je synchronní mechanická kruhová rychlost. Rozdíl přímky mechanického výkonu a sinusovky elektrického výkonu na pravé straně rovnice 1.2 určuje velikost akceleračního výkonu. Po vypnutí jednoho z vedení je P_E menší a zátěžný úhel δ se začne zvětšovat, respektive se urychluje rotor stroje. Zátěžný úhel roste až do hodnoty δ_1 , kdy se výkony srovnají, avšak rotor se pohybuje setrvačností dál. Vyšrafovaná plocha označená znaménkem + se nazývá tzv. akcelerační plocha, která odpovídá kinetické energii rotoru získaného pohybem z polohy δ_0 do polohy δ_1 . Pokud akcelerační plocha bude menší nebo rovna brzdící ploše značené znaménkem -, rotor se zpomalí a ustálí se v nové rovnovážné poloze δ_1 . Pokud by nastal opačný případ, rotor by zrychloval, zátěžný úhel by rostl a stroj by ztratil stabilitu. Uvedená metoda vyhodnocování přechodné stability se nazývá pravidlo ploch.

V praxi se obvykle metoda ploch nepoužívá. To je způsobené pracností metody a pro více strojové soustavy je tato metoda neproveditelná. Pro tento účel byly vytvořeny výpočetní programy nazývající síťové simulátory. Síťovými simulátory se bude podrobněji zabývat kapitola 2.

1.4 Činitele ovlivňující přechodnou stabilitu

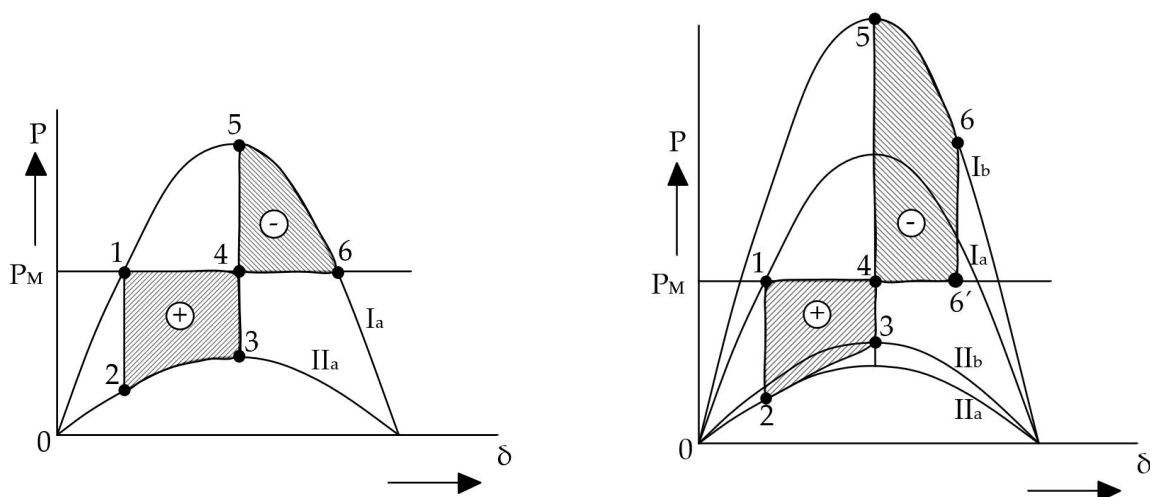
V předcházející kapitole bylo popsáno vyhodnocování přechodné stability vycházející ze zjednodušujících předpokladů. Rozbor například uvažoval synchronní stroj s hladkým rotorem, čímž byl zanedbán vliv promenné vzduchové mezery. V rozboru nebylo uvažováno ani působení regulátorů buzení synchronních strojů a regulátorů otáček hnacích strojů. Takové zjednodušení

bylo možné uplatnit za podmínek, kdy výše uvedené činitele z praktického hlediska nemají na průběh dynamického elektromechanického přechodného jevu významný vliv. Tento zjednodušující předpoklad však nelze vždy použít, jelikož v některých případech mohou tyto činitele významnou měrou ovlivnit výsledky analýzy. Následující odstavce proto uvádí problematiku těchto činitelů a míru jejich vlivu na přechodnou stabilitu [1].

1.4.1 Regulátor buzení

Významným činitelem ovlivňující průběh elektromechanického přechodného jevu může být regulátor buzení. působení regulátoru může zabránit vypadnutí ze synchronismu.

Při vzniku přechodného děje klesne svorkové napětí generátoru a regulační odchylka napětí ΔU vynutí regulátor buzení zvýšit budící proud. Ke změně budícího proudu ovšem dochází se zpožděním, které závisí na zesílení a časových konstantách regulátoru buzení a také na časové konstantě budícího vinutí generátoru. K posouzení vlivu regulace buzení na přechodnou stabilitu je použito schéma z obrázku 1.3.



(a) Bez uvažování regulace buzení

(b) S uvažováním regulace buzení

Obr. 1.7: Vliv regulace buzení na výkonovou charakteristiku

Vliv regulátoru buzení je znázorněn na obrázku 1.7. Průběh přechodného děje pro případ bez zásahu regulátoru buzení je znázorněn na obrázku 1.7a. Na tomto průběhu akcelerační plocha dosahuje vyšších hodnot než brzdná plocha, což vede k vypadnutí stability. Na obrázku 1.7b je pak znázorněn průběh přechodného děje s uvažováním regulace buzení. Působení regulátoru buzení se projeví zvýšením budícího proudu, čímž se zvýší přechodné elektromotorické napětí E' . Nárůst hodnoty budícího proudu, a tedy elektromotorického napětí, má dva pozitivní dopady. Vyrůstem elektromotorického napětí se zmenšuje akcelerační výkon, čímž se zmenší i akcelerační plocha ohraničená čísly 1-2-3-4. Jakmile je porucha odstraněna, tak systém z důvodu nové hodnoty přechodného elektromotorického napětí pokračuje ve vyšší výkonové charakteristice, čímž se nabízí větší brzdná plocha. Rotor dosáhne maximálního zátěžného úhlu v bodě 6, kdy brzdná

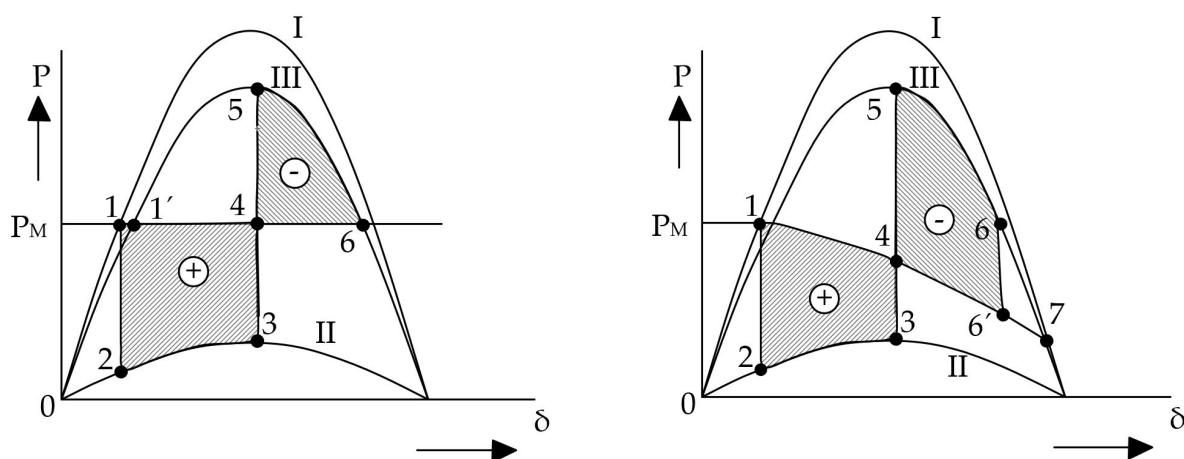
plocha 4-5-6-6' se shoduje s akcelerační plochou 1-2-3-4 a rotor se ustálí v rovnovážné poloze. Bez ohledu na hodnotu regulační odchylky napětí ΔV by měl regulátor buzení zvyšovat budící napětí při vzrůstajícím zátěžném úhlu δ a naopak snižovat budící napětí při klesajícím zátěžném úhlu δ [3].

1.4.2 Systémový stabilizátor

Systémový stabilizátor je zařízení sloužící jako doplňková řídicí smyčka pro stabilizátor napětí. Přidání řídicí smyčky bývá jedním z běžných způsobů zlepšující úhlovou stabilitu. Princip systémové stabilizace spočívá ve skutečnosti, že při konstantních otáčkách v ustáleném chodu by regulátor napětí měl být řízen odchylkou napětí ΔV způsobenou citlivostí měřících zařízení. V přechodném stavu se však otáčky generátoru mění, kdy dochází k oscilacím odchylky napětí ΔV způsobené změnou úhlu natočení rotoru $\Delta\delta$. Systémový stabilizátor má tedy za úkol dodat přídatný signál kompenzující oscilaci odchylky napětí a zajistit pozitivní tlumící účinek, který je ve fázi s odchylkou otáček generátoru $\Delta\omega$ [31].

1.4.3 Regulace otáček hnacích strojů

Jedním z významných regulačních prvků v elektrárnách je regulace otáček turbín. Cílem regulace otáček turbíny je snížit mechanický výkon turbíny během přechodných dějů, během kterých dochází ke snižování výkonu generátoru, a z toho vyplývající zrychlení otáček rotoru. Tuto problematiku ilustruje obrázek 1.8 vycházející z případu výpadku jednoho z paralelních vedení z obrázku 1.3. Obrázek 1.8a znázorňuje případ bez zásahu regulace otáček s konstantním mechanickým výkonem P_M , ve kterém akcelerační plocha převyšuje brzdící plochu, způsobující asynchronní otáčky rotoru a výpadek stability. Obrázek 1.8b uvažuje okamžité snížení mechanického výkonu po vzniku poruchy, čímž se zmenšuje akcelerační plocha a zvyšuje brzdící plocha ohraničená body 4-5-6-6'. Zásahem regulace otáček turbíny byla zachována stabilita systému.



(a) Bez uvažování regulace otáček turbíny

(b) S uvažováním regulace otáček turbíny

Obr. 1.8: Vliv regulace otáček turbíny na výkonovou charakteristiku

Co se týče technických požadavků regulace otáček turbíny, tak je požadována co nejrychlejší

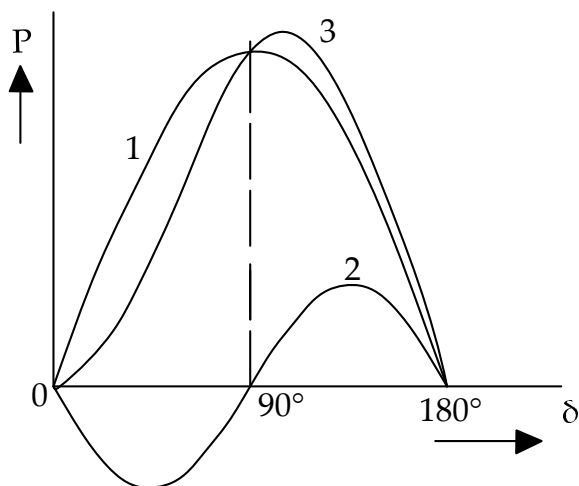
regulace. Rychlé změny mechanického výkonu předpokládají velmi rychlou reakci turbíny do jedné sekundy, během které trvá přechodný děj. Taková rychlá změna není u vodních turbín možná, jelikož pro řídicí ventil je vyžadována velká změna tlaku a točivého momentu. Rychlé změny na řídicím ventilu dále vyvolávají nežádoucí hydraulický ráz. Moderní parní turbíny umožňují na druhou stranu rychlé řízení ventilů, které vede ke zlepšení stability [3].

1.4.4 Proměnná vzduchová mezera

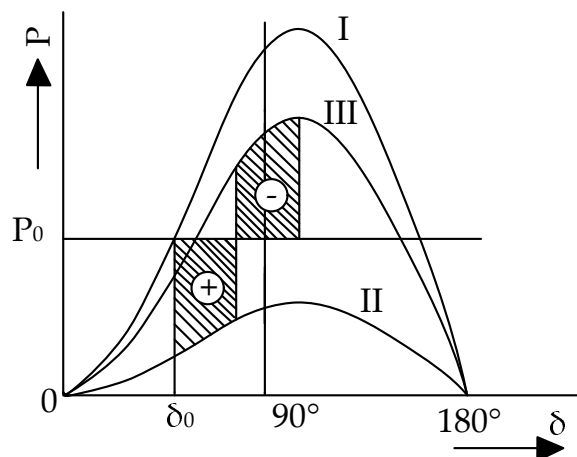
Dalším z možných činitelů mající vliv na výpočet přechodné stability je proměnná vzduchová mezera. Tento vliv byl možný v kapitole 1.3 zanedbat z toho důvodu, že byl uvažován stroj s hladkým rotorem, u kterého lze poměrně přesně počítat se shodnou synchronní reaktancí v podélné a příčné ose. Jiná situace nastává u strojů s vyniklými póly, jejíž vzduchová mezera není konstantní, čímž se mění magnetické poměry po obvodu rotoru. Níže je uveden vztah pro výkon synchronního stroje s vyniklými póly:

$$P = 3 \cdot \frac{E \cdot U_g}{X_d} \cdot \sin \delta_z + 3 \cdot \frac{U_g^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \sin 2\delta \quad (1.3)$$

Oproti vztahu platící pro stroj s hladkým rotorem 1.1 přibyl druhý člen. Tento člen se nazývá druhá harmonická výkonu, jelikož její perioda je oproti prvnímu členu poloviční. Tento vztah platí pro ustálený stav, avšak lze ho použít i pro přechodný stav, je však třeba poznamenat, že přechodná reaktance v podélné ose x'_d je menší přechodná reaktance v příčné ose x'_q . Z tohoto důvodu bude druhý člen ve vztahu 1.3 záporný.



Obr. 1.9: Závislost výkonu stroje s vyniklými póly na úhlu δ [1]



Obr. 1.10: Akcelerační a brzdící plocha pro stroj s vyniklými póly [1]

Obrázek 1.9 názorně ilustruje průběh závislosti výkonu stroje s vyniklými póly na zátěžném úhlu δ . Silně vyznačená čára (značená jako 3) představuje výsledný průběh, tenké čáry představují jednotlivé členy vztahu 1.3 (první člen představuje čáru 1, druhý člen představuje čáru 2). Zanedbáním proměnné vzduchové mezery by vymizel druhý člen a výsledný průběh by odpovídal pro stroj s hladkým rotorem. Skutečný průběh má výše položené maximum, které

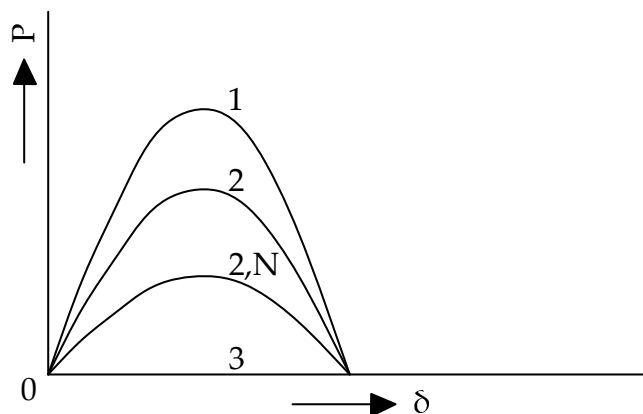
odpovídá pro zátěžný úhel vyšší než 90° . Tím se zmenší akcelerující plocha a zvětší se brzdící plocha, jak je patrné z obrázku 1.10. Z praktického hlediska je tedy uvažování proměnné vzduchové mezery příznivé, jelikož přípustná doba trvání zkratu se zvětší, avšak toto zvětšení není natolik velké (přibližně setiny sekund), aby se uvažovaly komplikované výpočty s uvažováním proměnné vzduchové mezery.

Kromě zmíněného příznivého vlivu druhé harmonické výkonu se však u stroje s vyniklými póly objevují jiné nepříznivé okolnosti. Oproti stroji s hladkým rotorem má stroj s vyniklými póly menší časovou mechanickou konstantu T_m z důvodu nižších jmenovitých otáček, kterých stroj při rozběhu dříve dosáhne. Další nepříznivou okolností je větší přechodná reaktance u strojů s vyniklými póly, na kterou se vztahuje i větší vazební reaktance.

Ze zmíněných okolností plyne skutečnost, že z hlediska vyhodnocování přechodné stability je třeba věnovat zvýšenou pozornost strojům s vyniklými póly, které jsou na rozdíl od strojů s hladkým rotorem náchylnější k vypadnutí ze synchronismu [1].

1.4.5 Druh zkratu

Jeden z nejzávažnějších činitelů ovlivňujících průběh přechodného jevu a zachování stability soustavy je druh zkratu, který má dopad na velikost vazební impedance během zkratu. Největší hodnota vazební impedance se dosahuje u trojfázového zkratu, který je zároveň nejzávažnějším zkratem. Pokud se tedy zvolí jako základní porucha trojfázový zkrat, tak stabilita zůstane zachována i pro další druhy zkratu.



Obr. 1.11: Výkonové charakteristiky při různých druzích zkratu [1]

1 - jednofázový zkrat, 2 - dvoufázový zkrat, 2,N - dvoufázový zemní zkrat, 3 - trojfázový zkrat

Zvolení druhu zkratu jako základní poruchy má také vliv na využití soustavy, jak lze porovnat na výkonových charakteristikách na obrázku 1.11. Zvolením jednofázového zkratu jako základní poruchy může soustava přenášet největší výkon, na druhou stranu dochází ke ztrátě stability při jiných druzích zkratu. Volbu základní poruchy při vyhodnocování přechodné stability je tedy vhodné provést na základě poruchových statistik dané soustavy. V sítích s nízkou četností trojfázových poruch je žádoucí zvolit za základní poruchu jednofázový zkrat, aby se zvýšilo využití soustavy. Je však vhodné vzít v úvahu riziko ztráty stability při těžších druzích zkratů [1].

1.4.6 Rezistance

Poslední uvedený vliv, který bývá obvykle opomíjen při vyhodnocování přechodné stability, je rezistance v soustavě. Rezistance se zpravidla zanedbává v sítích velmi vysokého napětí, kde je rezistance v poměru s reaktancí soustavy velmi malá. Uvažování rezistance má příznivý dopad, jelikož její přítomnost zatěžuje synchronní stroj z důvodu vznikajících ztrát. Během zkratu je tedy odlehčení menší a menší je i urychlující výkon.

Zpravidla lze rezistanci ve výpočtu zanedbat, aniž by to znamenalo výrazné ovlivnění výsledku řešení přechodné stability. Lze se však setkat s případem, u kterého je vhodné posoudit vliv rezistance na přesnost řešení. Taková situace může nastat například u zkratu za delším úsekem vedení [1].

1.5 Stabilita vícestrojové soustavy

V kapitole 1.3 byl představen princip a vyhodnocování přechodné stability na soustavě jedno-
strojového generátoru a tvrdé sítě. Zjednodušit vícestrojovou soustavu na jednoduchou soustavu SMIB lze v případě, že vzniklá porucha zasáhne pouze jeden generátor a na ostatní generátory v systému má porucha zanedbatelný vliv. Moderní systémy disponují kvalitně vybudovaným vedením s elektrárnami blízko u sebe, proto zmíněné zjednodušení nemusí být vždy splněno. V takových okolnostech porucha vzniklá blízko jedné elektrárny naruší také výkonovou rovnováhu sousedních elektráren.

Kritický úhel δ_k je definován jako maximální úhlový rozdíl zátěžných úhlů rotorů generátorů, které

$$\delta_k < \delta_{max} = \max(|\delta_i - \delta_j|), \quad (1.4)$$

kde δ_{max} je maximální úhlový rozdíl mezi δ_i a δ_j v jednom okamžiku. V případě jedno-
strojového modelu z kapitoly 1.3 lze s jistotou říci, že při dosažení zátěžného úhlu $\delta = 180^\circ$ nevyhnutelně dochází k výpadku ze synchronismu. V případě vícestrojové stability se generátory propojené do soustavy vzájemně ovlivňují, přičemž může docházet k vysokým výkyvům zátěžných úhlů rotorů, aniž by došlo k nestabilitě soustavy. Nelze proto s jistotou tvrdit, že v případě vícestrojové soustavy dochází k vypadnutí ze synchronismu při dosažení maximálního zátěžného úhlu 180° jak například uvádí tato publikace [27]. Naopak hodnota kritického zátěžného úhlu $\delta_k = 360^\circ$ znamená, že úhlový rozdíl mezi 2 generátory přesahuje celou periodu a při dosažení takového úhlového rozdílu je tak očekávána nestabilita soustavy. Dle publikace [26] neplatí jednoznačná volba hodnoty kritického úhlu, jelikož různé studie uvedené v článku volily jako hodnotu kritického úhlu δ_k jednu ze dvou možností, a to buď 180° a nebo 360° . Zvolením kritického úhlu $\delta_k = 360^\circ$ totiž sice lze zaručit identifikování nestability soustavy, avšak vyhodnocení poruchy trvá delší dobu než v případě $\delta_k = 180^\circ$ [26].

Výpadek generátoru ze synchronismu ve vícestrojové soustavě může proběhnout jedním z uvedených způsobů:

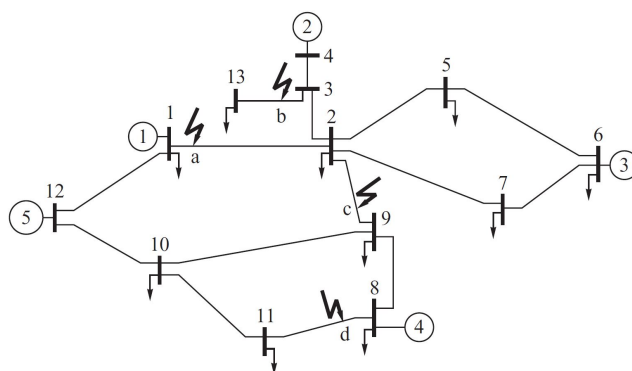
- Generátor elektricky nejbližší poruše vypadá ze synchronismu krátce po vzniku poruchy, přičemž na uvedeném generátoru nevzniká kývání rotoru. Vzniklá porucha se na zbylých

generátorech soustavy projeví periodickými kyvy a vrací se do ustáleného stavu.

- Vzniklá porucha se na elektricky nejbližším generátoru projeví kýváním rotoru následováno výpadkem ze synchronismu. Podobně jako v prvním případě se zbylé generátory po periodických kyvech navrací do ustáleného stavu.
- Generátor elektricky nejbližší poruše vypadáva ze synchronismu, přičemž je následován dalšími generátory v soustavě.
- Vzniklá porucha se na elektricky nejbližším generátoru projeví kýváním rotoru bez výpadku ze synchronismu, avšak ze synchronismu vypadáva generátor elektricky vzdálený poruše.

První případ lze popsat i na jednostrojovém modelu vyvedeném do sítě nekonečného výkonu, u kterého se kolaps sítě způsobeným výpadkem generátoru ze synchronismu. Zbylé 3 případy je nestabilita způsobena interakcí s ostatními generátory v soustavě. V druhém případě se zpočátku generátor snaží udržet stabilní chod, avšak vzniklé kývání zbylých generátorů zhoršují podmínky pro zachování stability a generátor tak vypadáva ze synchronismu. V třetím případě může výpadek generátoru elektricky nejbližšího poruše významně postihnout zbylé generátory soustavy, které také mohou vypadnout ze synchronismu. Poslední případ se zpravidla projevuje na generátorech elektricky vzdálené poruše, které jsou však slabě propojené se soustavou. Při vzniklých oscilacích se zhoršují provozní podmínky slabě propojených generátorů se soustavou, které tak mohou vypadnout ze synchronismu.

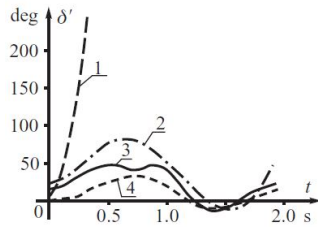
Níže uvedený příklad ilustruje výše zmíněné případy. Nakonec je tam případ Omahen, který lze použít. Schéma 1.12 znázorňuje soustavu zahrnující 3 subsystémy společně propojené uzlem 2, přičemž generátor 5 je vzhledem ke svému výkonu uvažován jako zdroj nekonečného výkonu. Obrázky 1.13a-1.13d představují zátěžné úhly všech generátorů δ' , které jsou vztažené ke generátoru 5. Tyto zátěžné úhly byly zaznamenány během poruch vytvořených na místech a, b, c nebo d, přičemž se uvažuje odstranění poruchy bez opětovného zapnutí.



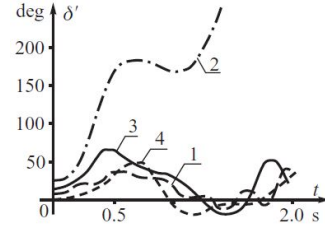
Obr. 1.12: Schéma testovacího systému Omahen 1994 [3]

Pokud v případě *a* vznikne porucha na vedení 1-2, tak z obrázku 6.2a si lze povšimnout generátor 1 vypadající ze synchronismu, zatímco ostatní generátory prodělávají několik period kývání. V případě *b* při vzniku poruchy na vedení 3-13 lze pozorovat generátor 2, že při první

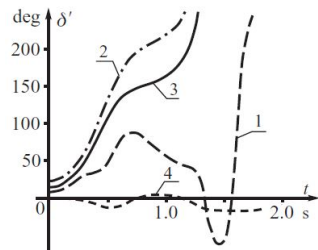
periodě se drží, avšak oscilace rotorů ostatních generátorů zvyšuje změny hodnot vzájemných úhlů, přičemž u generátoru 2 způsobí porucha a následně vypadává ze synchronismu během druhé periody. V případě *c* vznikla porucha na vedení 2-9, kdy během prvního kyvu selhávají generátory 2 a 3, které jsou následovány generátorem 1. Příklad *d* znázorňuje poruchu na vedení 8-11, kdy se vzájemné úhly navyšují.



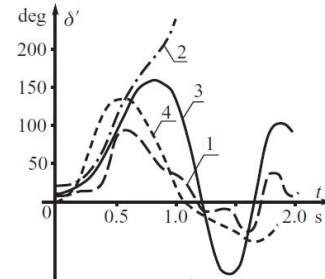
(a) Zkrat v místě a



(b) Zkrat v místě b



(c) Zkrat v místě c



(d) Zkrat v místě d

Obr. 1.13: Průběhy zátěžných úhlů generátorů soustavy Omahen

Metody měření vzájemných úhlů

V předchozí kapitole byla popsána problematika vyhodnocování přechodné stability u vícestrojových modelů.

První metoda uvažuje jako referenci stroj v uzlu, který je zpravidla uzlem bilančním. Vztah 1.5 pak definuje jednotlivé zátěžné úhly vztažené ke stroji v uzlu 1 v systému o m počtu strojů:

$$\delta'_i = \delta_i - \delta_1 \quad i = 1, \dots, m \quad (1.5)$$

Druhá metoda, obecně užívaná při vyhodnocování přechodné stability, je tzv. střed setrvačnosti (angl. Centre of inertia - COI). Tato metoda definuje zátěžný úhel δ_{COI} v systému o m počtu strojů vztahem 1.6:

$$\delta_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \delta_i, \quad (1.6)$$

kde M_T je součet jednotlivých mechanických časových konstant příslušných strojů v systému, definovaný vztahem 1.7 a M_i představuje mechanickou časovou konstantu 1.7 i -tého stroje v poměru s úhlovou rychlostí ω_s definovanou vztahem 1.8.

$$M_T = \sum_{i=1}^m M_i \quad (1.7)$$

$$M_i = \frac{2H_i}{\omega_s} \quad (1.8)$$

Zátěžné úhly jednotlivých strojů referované vůči δ_{COI} se vypočítají vztahem 1.9.

$$\bar{\delta}_i = \delta_i - \delta_{COI} \quad (1.9)$$

Obdobnými vztahy lze definovat úhlové rychlosti jednotlivých strojů vůči vypočítané referenční úhlové rychlosti ω_{COI} [13].

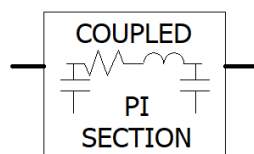
2 Modelování přechodné stability v simulačních programech

Cílem této kapitoly je představit způsob modelování prvků síťových modelů v síťových simulátorech PSCAD a MODES. Poznatky z této kapitoly jsou aplikovány na vytvořených síťových modelech, jejichž postup modelování se věnují další kapitoly. Tato kapitola také uvádí možnosti simulování činitelů uvedených v kapitole 1.4. Informace zmíněné v této kapitole vycházejí z dokumentace PSCADu [10] a MODESu [20].

2.1 Vedení

Vedení je definováno skrze jeho podélné parametry (odpor R [Ω] a indukčnost L [H]) a příčné parametry (konduktance G [S] a kapacita C [F]), přičemž v analytických výpočtech bývá konduktance kvůli zanedbatelnému vlivu zanedbávána.

Program PSCAD umožňuje reprezentovat vedení dvěma způsoby. Prvním způsobem je použití konfigurátoru nacházející se ve standardní knihovně TRANSMISSION LINES, kde je mj. uveden i postup pro vytvoření uvedeného modelu vedení. Druhým způsobem reprezentace vedení v PSCADu je použití π -článku pomocí bloku s názvem COUPLED PI SECTION ze standardní knihovny PI SECTIONS. Parametry vedení umožňuje uvedený blok zadat přes skutečné nebo přepočtené hodnoty odporu R , reaktance X_l a kapacity X_c , ale i přes přepočtené hodnoty odporu r , reaktance x a susceptance b . Pokud se uživatel rozhodne pro reprezentaci vedení popisovaný blokový model, tak dle dokumentace programu [10] v záložce Main Configuration byl měl vždy zvolit typ modelu Coupled, kdy typ modelu Nominal by neměl být používán k reprezentaci přenosového vedení.



Obr. 2.1: Model synchronního generátoru v PSCADu

Pro reprezentaci vedení se v MODESu používá model označený jako Větev. Ten reprezentuje zadaný prvek pomocí Π článku. Mezi zadávané parametry modelu patří odpor R [Ω], reaktance X [Ω] a susceptance B (μ S), které se zadávají přímo v pojmenovaných jednotkách a přepočtené na danou napěťovou hladinu. (Dále se zadává poměrný převod u_t [-], který odpovídá nastavení přepínače odboček transformátoru. V případě vedení je zadávaný poměrný převod u_t roven jedné.

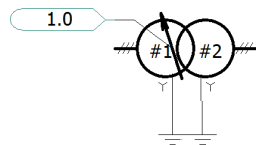
2.2 Transformátor

Blokové modely transformátorů lze najít v knihovně TRANSFORMERS. Pro potřeby této práce byl zvolen model dvojvínového transformátoru ze standardní knihovny TRANSFORMERS,

který byl nastaven následujícím způsobem. Všechny transformátory mají nastavené zapojení Ynyn. Převod transformátoru je dán pomocí jmenovitých napětí v uzlech, mezi které je daný transformátor připojen. Vzhledem k dostupným zdrojům se uvažují jen hodnoty odporu r a reaktance x transformátoru, ztráty v železe se zanedbávají a sycení transformátoru není uvažováno. K dosažení uvedeného nastavení byly nastaveny parametry bloku podle tabulky 2.1. Pokud by uživatel potřeboval nastavit poměrnou hodnotu napětí odpovídající nastavení přepínače u_t , musí tuto hodnotu přivést konstantním signálem na vyvedenou odbočku transformátoru jak je znázorněno na obrázku 2.2. Nastavení odbočky dle obrázku 2.2 se provede v záložce **Configuration/Tap changer on winding** zvolením možnosti #1.

Symbol v PSCADu	Tmva	f	YD1	YD2	XI	CuL	V1	V2
Zadaná hodnota	S_n	f	Y	Y	\mathbf{x}	\mathbf{r}	\mathbf{U}_1	\mathbf{U}_2

Tab. 2.1: Ekvivaletní výpis parametrů pro model transformátoru v programu PSCAD



Obr. 2.2: Model transformátoru v programu PSCAD v zapojení Ynyn

V MODESu se transformátor nastavuje obdobně jako u vedení modelem **Větev**. Poměrný převod u_t se na rozdíl od modelu v PSCADu zadává přímo v nastavení modelu. Samotný převod transformátoru se nezadává, jelikož je dán poměrem napětí v uzlech, mezi které je konkrétní transformátor připojen.

2.3 Zátěž

Obvyklou metodou pro reprezentaci zátěže je uvažování konstantní impedance. Dynamické chování reálné zátěže se však od chování konstantní impedance liší, proto reprezentování zátěže konstantní impedancí může mít významný vliv na výsledky simulace stability. Naneštěstí nebývá dynamické chování zátěže podrobně známé, z toho důvodu je tak nutné se spokojit s reprezentací zátěže konstantní impedancí.

Pro reprezentaci modelu zatížení v PSCADu je používán model třífázového zatížení nazývaným **Fixed Load** z knihovny **PASSIVE ELEMENTS**, který je zobrazen na obrázku 2.3a. Tímto modelem lze nastavit zatížení zadáním hodnot činného a jalového výkonu. Tento model umožňuje nastavit závislost odběru na frekvenci a napětí dle vztahů 2.1 a 2.2:

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^a \cdot (1 + K_{Pf} \cdot df), \quad (2.1)$$

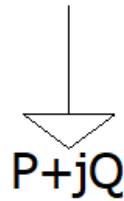
$$Q = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^b \cdot (1 + K_{Qf} \cdot df), \quad (2.2)$$

kde P [W] je odebíraný činný výkon, P_0 [W] je zadaná hodnota činného výkonu, Q [VAr] je odebíraný jalový výkon, Q_0 [VAr] je zadaná hodnota jalového výkonu, U [V] je hodnota napětí na odebíraném uzlu, U_0 [V] je zadaná fázová hodnota napětí v místě připojení zátěže, koeficienty a [-] a b [-] vyjadřují závislost činného/jalového výkonu na napětí, koeficienty K_{Pf} [Hz⁻¹] a K_{Qf} [Hz⁻¹] vyjadřují závislost činného/jalového výkonu na frekvenci a df [-] značí odchylku frekvence f [Hz] od jmenovité frekvence f_n [Hz] [5]. Zadávání hodnot do modelu zátěže ilustruje tabulka 2.2. Z tabulky 2.2 je patrné, že uživatel zadává jednofázovou hodnotu činného a jalového výkonu. Napětí v místě připojení zátěže U_0 se v modelu zadává jako fázová hodnota napětí. Pokud by dostupné materiály nedefinovaly závislost odběru na frekvenci a napětí, zadáním nulových hodnot se uvedené závislosti zanedbají.

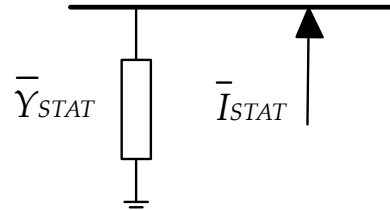
Symbol v PSCADu	PO	QO	VBO	NP	NQ	KPF	KQF	FR
Symbol dle vztahů 2.1 a 2.2	$\frac{1}{3} \cdot P_0$	$\frac{1}{3} \cdot Q_0$	U_0	a	b	K_{Pf}	K_{Qf}	f_n

Tab. 2.2: Ekvivalentní výpis parametrů pro model zátěže

V případě MODESu je statický model zátěže nahrazen konstantní admitancí Y_{stat} a kompenzačním vstřikovaným proudem I_{stat} , jak znázorňuje obrázek 2.3b. Tento model je použitelný pro malé změny napětí U a frekvence f a platí po odeznění rychlých přechodných dějů. Model je tak použitelný pro krátkodobou a dlouhodobou dynamiku. Bližší popis uvedeného modelu se nachází v příručce MODESu [20].



(a) PSCAD



(b) MODES

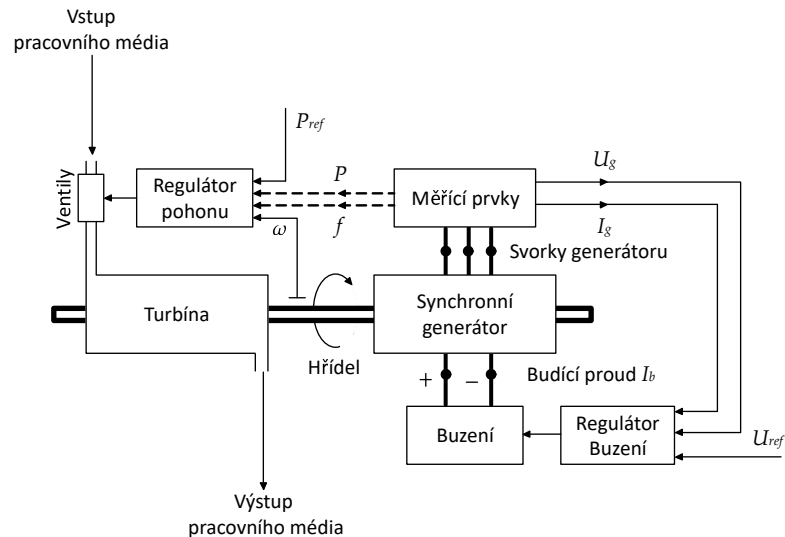
Obr. 2.3: Reprezentace modelování zatížení

2.4 Prvky elektrárenského bloku

Z hlediska parametrizace prvků modelu sítě patří prvky elektrárenského bloku k nejsložitějším. Elektrárenský blok sestává z mnoha dílčích komponent, jak ilustruje zjednodušené blokové schéma 2.4. Oproti pasivním prvkům sítě je u prvků bloku nutné zvolit jiný přístup k popisu jejich parametrů. Samotné uvedení použitých parametrů je nedostačující, ale musí být napsány použité přenosové funkce. Reprezentace těchto prvků jsou stanoveny dle typizovaných modelů deklarovaných dle vytvořených standardů.

2.4.1 Synchronní generátor

Při vyhodnocování stability byl dříve používán klasický model pro reprezentaci synchronního stroje. Podstata se jako postačoval tento klasický model generátoru, jelikož tehdejší elektrická soustava nebyla tak rozsáhlá. Z důvodu dnešní propojenosti velkých soustav způsobují



Obr. 2.4: Blokové schéma elektrárenského bloku [15]

přechodné děje delší průběhy periodických kyvů. Klasický model je neadekvátní pro reprezentaci systému za první periodou synchronního kyvu a pro přesnější analýzu přechodné stability je vhodné použít matematické modely synchronního generátoru.

Pro popis synchronního stroje bývá vinutí transformováno do soustavy $d, q, 0$ obvykle pojmenovaná podle svého tvůrce Parkova transformace, která označuje podélnou osu d a příčnou osu q . Jednotlivé veličiny potřebné pro popis stroje (elektromotorické síly, proudy, reaktance a časové konstanty) se uvažují v těchto osách (např. synchronní reaktance v podélné ose). Odvozením soustavy diferenciálních napěťových rovnic synchronního generátoru se zabývá řada publikací [25]. Je obvyklé používat poměrných hodnot parametrů, přičemž jako vztažné hodnoty pro jejich určení se volí jmenovitý (zdánlivý) výkon a jmenovité napětí generátoru. Výpis používaných parametrů se nachází v tabulce 2.3.

Program PSCAD umožňuje reprezentovat synchronní stroj pouze skrze Parkovu transformaci, přičemž je pro použití připravený model z knihovny **MACHINES**. Nastavení uvedeného modelu je podrobně popsán v podkapitole 2.5.

Celý název	Veličiny	Jednotka
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_n	MVA
Jmenovité napětí	U_n	kV
Jmenovitý účinník	$\cos\varphi_n$	-
Časová mechanická konstanta	H	s
Koeficient tlumení	D	p.u.
Odpor vinutí kotvy	r_a	p.u.
Synchronní reaktance v podélné ose	x_d	p.u.
Přechodná reaktance v podélné ose	x_d'	p.u.
Rázová reaktance v podélné ose	x_d''	p.u.
Synchronní reaktance v příčné ose	x_q	p.u.
Přechodná reaktance v příčné ose	x_q'	p.u.
Rázová reaktance v příčné ose	x_q''	p.u.
Potierova reaktance	x_l	p.u.
Přechodná časová konstanta v podélné ose	T_{d0}'	s
Rázová časová konstanta v podélné ose	T_{d0}''	s
Přechodná časová konstanta v příčné ose	T_{q0}'	s
Rázová časová konstanta v příčné ose	T_{q0}''	s
Saturace při hodnotě napětí 1.0 p.j.	$S(1.0)$	-
Saturace při hodnotě napětí 1.2 p.j.	$S(1.2)$	-

Tab. 2.3: Hodnoty generátorů [7]

2.4.2 Budicí systém

Pro reprezentaci buzení v PSCADu lze použít z 19 blokových modelů z knihovny **MACHINES**, které korespondují se standardem IEEE [9]. Pokud by bylo nutné použít model buzení neodpovídající výše uvedeným, tak jej lze vytvořit skrze bloky přenosových funkcí nacházející se v knihovně **CSMF**.

V programu MODES lze buzení reprezentovat 7 modely buzení, z nichž 6 jsou v souladu se standardem IEEE [9] a posledním z nich je model označovaný jako **STAN**. Na rozdíl od PSCADu neumožňuje MODES vytvořit vlastní model buzení.

2.4.3 Systémový stabilizátor

Podobně jako u modelů buzení lze v PSCADu systémový stabilizátor reprezentovat 4 standardizovanými modely dle IEEE [9].

Program MODES umožňuje reprezentovat systémový stabilizátor skrze dva alternativní modely se zjednodušenou strukturou. Bližší popis v příručce MODESu [20].

2.4.4 Regulátor otáček

Model pohonu synchronního stroje se skládá ze tří prvků - pohonného mechanismu (turbína nebo motor), zdroje pohonného média a regulátoru. V knihovně **MACHINES** se nachází model **TGOV1** skládající se z 2 bloků, a to parní turbíny a regulátoru otáček. V tabulce 3.1 jsou vypsány zadané hodnoty takovým způsobem, aby odpovídaly referovanému modelu z dokumentu [7].

Pro uvažování rychlého řízení ventilů je nutné použít specifické modely. U PSCADu je nutné použít

Programy PSCAD i MODES umožňují si zvolit ze standardní knihovny jako pohon kromě parní turbíny i vodní turbínu, větrnou turbínu, které však nebyly v práci použity. Pro případné zájemce jsou uvedené modely popsány v příručkách PSCADu [10] a MODESu [20].

2.5 Modelování synchronního generátoru v PSCADu

Pro reprezentaci synchronního generátoru v programu PSCAD lze použít připravený model ze standardní knihovny **MACHINES**, který odpovídá Parkově transformaci. Aby uživatel mohl zadat parametry stroje z tabulky 2.3, musí být zvolen postup nastavení modelu uvedeného v kapitole 2.5.1 musí obsahovat nastavení parametry stroje z tabulky 2.3. Rozhraní modelu je dále popsáno v kapitole 2.5.2.

2.5.1 Parametrizace modelu

V záložce **Configuration** se nastavují základní vlastnosti generátoru, které se projeví v dalších záložkách modelu. Je nutné nastavit v řádku **No. of Q-axis Damper Windings** hodnotu **Two**, čímž se definoval synchronní stroj s vyniklými póly. Dokument definuje odpor kotvy pomocí časové konstanty, proto v řádku **Armature Resistance as:** se nastaví hodnota **Time-Cons.**

V záložce **Generator Data Format** se zadávají jednotlivé reaktance a časové konstanty stroje na základě Parkovy transformace z tabulky 2.3, přičemž způsob zadávání hodnot do modelu generátoru znázorňuje tabulka 2.4.

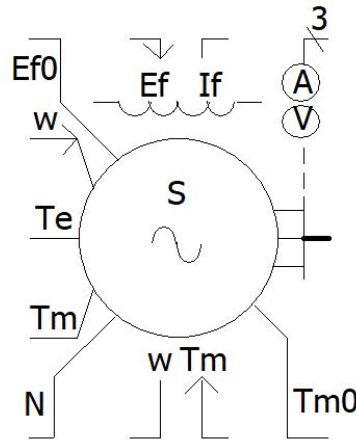
Symbol parametru v PSCADu	Ra	Xp	Xd	Xd ₋	Tdo ₋	Xd ₋
Symbol dle tabulky 2.3	r_a	x_l	x_d	x'_d	T'_{d0}	x''_d
Symbol parametru v PSCADu	Tdo ₋	Xq	Xq ₋	Tqo ₋	Xq ₋	Tqo ₋
Symbol dle tabulky 2.3	T''_{d0}	x_q	x'_q	T'_{q0}	x''_q	T''_{q0}

Tab. 2.4: Výpis veličin pro synchronní stroj [7]

2.5.2 Rozhraní modelu

Model synchronního generátoru se všemi rozhraními je zobrazen na obrázku 2.5.

Model synchronního generátoru v PSCADu disponuje velkou řadou vstupů a výstupů, které slouží ke komunikaci s regulačními prvky elektrárenského bloku. 3 vstupní rozhraní modelu jsou následující:



Obr. 2.5: Model synchronního generátoru v PSCADu

- w označuje vstup otáček pro jejich přímé řízení. Pro spuštění simulace není tento vstup potřebný a pokud uživatel tento vstup nepoužije, pak nastavením v modelu generátoru **Configuration/Multimass interface** lze vstup vypnout zvolením možnosti **DISABLE**.
- T_m značí vstup mechanického momentu pohonného stroje (turbíny) v poměrných jednotkách. Na tento vstup musí být připojen signál, v opačném případě vyskočí chybová hláška upozorňující na chybějící signál.
- E_f představuje vstup budicího napětí v poměrných jednotkách (které je výstupem z budicího systému). Česká literatura pro tuto veličinu obvykle používá označení u_b (p.u.). Opět platí, že na tento vstup musí být přiveden signál, jinak se simulaci nepodaří spustit a uživatel je informován chybovou hláškou.

Model má dále k dispozici celkem 7 výstupních signálů, které slouží zejména pro možnost přímého připojení dalších modelů. Jednotlivé výstupy jsou:

- T_e : výstup elektrického momentu generátoru v poměrných jednotkách,
- T_m : výstup mechanického momentu na hřídeli v poměrných jednotkách,
- N : vyvedení středu vinutí generátoru. Pokud se uživatel rozhodne uzemnit použitý model generátoru, musí v nastavení **Configuration/External Neutral Connection** zvolit možnost **Enable**. Samotné uzemnění je nutné dodatečně připojit.
- w : výstup otáček v poměrných jednotkách. Pokud uživatel používá model regulátoru otáček vyžadující výstup otáček v radiánech za sekundu volbou, lze tak nastavit v **Interface To Machine Controllers/ Output speed/** volbou **rad/s**.
- T_{m0} : výstup požadovaného mechanického momentu. Tuto hodnotu model dopočítává na základě odebíraného činného výkonu a slouží především k inicializaci regulátoru otáček.
- A/V informuje o svorkovém napětí generátoru u [p.u.] a proudu generátoru i [p.u.]. V nastavení **Interface To Machine Controllers/Supply terminal conditions to exciter** lze zvolit požadovaný výstup, a to buď žádný **None**, pouze napětí **Vt**, pouze proud **It** nebo napětí

i proud V_t , přičemž požadovaný výstup uživatel volí na základě požadavků modelu budícího systému.

- If: výstup budícího proudu v poměrných jednotkách, který protéká v budicím vinutí generátoru.
- Ef0: výstup požadované hodnoty budícího napětí v poměrných jednotkách. Slouží zejména pro potřeby inicializace budícího systému.

2.5.3 Inicializace modelu generátoru

Použitím budícího systému a regulátoru otáček v modelu se dle dokumentace programu [10] uživatel vystavuje problému s dosažením ustáleného stavu systému. Z tohoto důvodu je v programu PSCAD popsána metoda inicializace synchronního generátoru. Tato inicializace má dle dokumentace urychlit dosažení žádaného ustáleného stavu v simulované soustavě. Dále model disponuje inicializací synchronního generátoru v PSCADu. Průběh této inicializace je popsán v manuálu programu [10] následovně:

- V čase $t = 0$ se generátor chová jako napěťový zdroj s konstantním napětím. Velikost napětí a fázový posuv se zadává v záložce **Initial conditions**.
- V čase $t = S2M$ dochází k přechodu z napěťového zdroje na synchronní stroj, kdy dochází k aktivování budícího systému.
- V čase $t = LRR$ se inicializuje turbína a regulace otáček. Zároveň model generátoru již neuvažuje konstantní otáčky, kdy otáčky rotoru jsou dány pohybovou rovnicí 1.2.

Definování zmíněných 2 časů se nastavuje v záložce **Variable Initialization Data**. Velikost časů se odvíjí od mnoha proměnných. Zároveň je třeba zkontrolovat v záložce **Output Variables For Controller Initialization** názvy proměnných, zda se shodují s názvy u modelů buzení a turbíny. V opačném případě by nedošlo k inicializaci a při spuštění simulace by byla oznámena chyba.

Uživatel se může vyhnout použití modelů budícího systému nebo regulátoru otáček (například přivedením konstantního signálu). Dokumentace však uvádí, že tato metoda není vhodná pro simulování přechodných jevů, což není předmětem této práce.

2.6 Simulování činitelů v programu PSCAD

Tato kapitola se dotýká možností simulace činitelů zmíněných v podkapitole 1.4 v programu PSCAD.

- Vliv proměnlivé vzduchové mezery lze uvažovat pomocí modelu generátoru, kde v nastavení **No. of Q-axis Damper Windings** se volí synchronní stroj s hladkým rotorem (položka **One**), nebo synchronní stroj s vyniklými póly (položka **Two**).

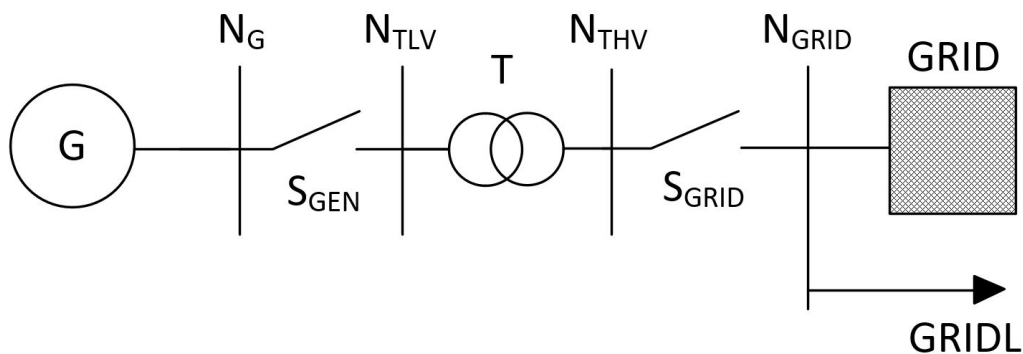
- Druh zkratu lze zvolit v komponentě 3-fázové poruchy v knihovně **Breakers & Faults**. V záložce **Fault Type** lze zvolit, na jakých fázích vzniká porucha a zda je tato porucha spojená se zemí.
- Vliv regulace buzení v programu PSCAD byl již definován v části 1.4.1. Knihovna v PSCADu dále umožňuje použít jiné blokové modely budícího systému. Pro regulaci buzení lze použít stejnosměrný, střídavý nebo statický systém buzení.
- Vliv regulace otáček turbíny byl vysvětlen v kapitole 3.4. Knihovna v PSCADu umožňuje provádět simulaci s parní nebo vodní turbínou.
- Rezistance soustavy lze nastavit ve konfiguraci vedení. Tento vliv nebyl použit ve vytvořeném modelu dle [7], jelikož vedení není ve zmíněném modelu zahrnuto.
- Vliv tlumení a ztrát lze zahrnout nastavením hodnot mechanického tření a ztrát v železe v záložce **Basic Data** modelu synchronního generátoru. Ztráty způsobené třením u turbíny lze uvažovat nastavením hodnoty D_t nacházející se v obrázku 3.5. Uvedený dokument avšak neuvažuje žádné ztráty, proto vliv tlumení a ztrát není ve vytvořeném modelu zahrnut.

3 Model Single Machine - Infinite Bus

Tato kapitola představuje jednostrojový model vyvedený do sítě nekonečného výkonu obvykle označovaný jako SMIB. V úvodu je uvedena referenční dokumentace, podle které byl uvedený model vytvořen.

3.1 Představení modelu

Sestavení dynamického modelu SMIB vycházelo z dokumentu [7] pracovní skupiny "System Protection and Dynamics" spadající pod ENTSO-E. Cílem uvedené skupiny bylo vytvořit jednoduchý dynamický model, jehož dynamické chování by se shodovalo napříč užívanými simulačními programy používanými provozovateli přenosových soustav kontinentální Evropy. Překreslené schéma testovaného modelu z dokumentu [7] se nachází na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Jednopolové schéma testovaného modelu z [7]

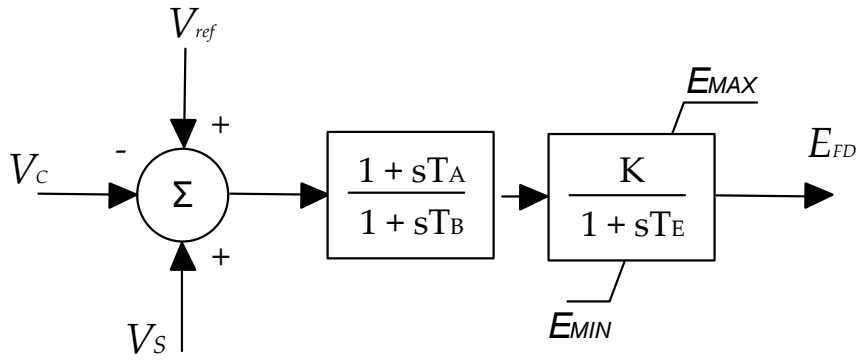
Aby uvedený model mohl být využit pro zkoumání přechodných jevů, tak byly ke synchronnímu stroji připojen budicí systém a regulátor otáček hnacího stroje. Popisu použitých modelů a jejich nastavení se věnuje další část této kapitoly.

3.2 Modelování buzení

Model buzení podle [7] reprezentuje zjednodušený model označovaný jako SEXS, který představuje budicí systém i automatickou regulaci napětí. Model neuvažuje sycení stroje. Blokové schéma modelu SEXS je znázorněno na obrázku 3.2.

Model SEXS disponuje 3 vstupními veličinami. Signál V_S značí výstupní signál získaný systémovým stabilizátorem. Další veličinou je referenční signál V_{REF} , jehož velikost je odvozena ze sekundární regulace napětí. Posledním vstupem je signál V_C získaný tzv. regulací vnější impedance, jehož blokové schéma lze pozorovat na obrázku 5.2. [9] Výstupem modelu SEXS je velikost budicího napětí E_{FD} , který je připojen na model generátoru.

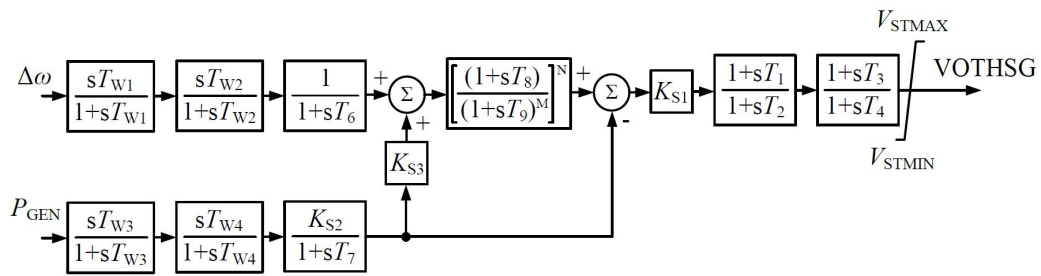
Přenosová funkce uvedeného budicího systému byla sestavena skrze jednotlivé bloky z knihovny CSMF.



Obr. 3.2: Blokové schéma modelu SEXS z dokumentu [7]

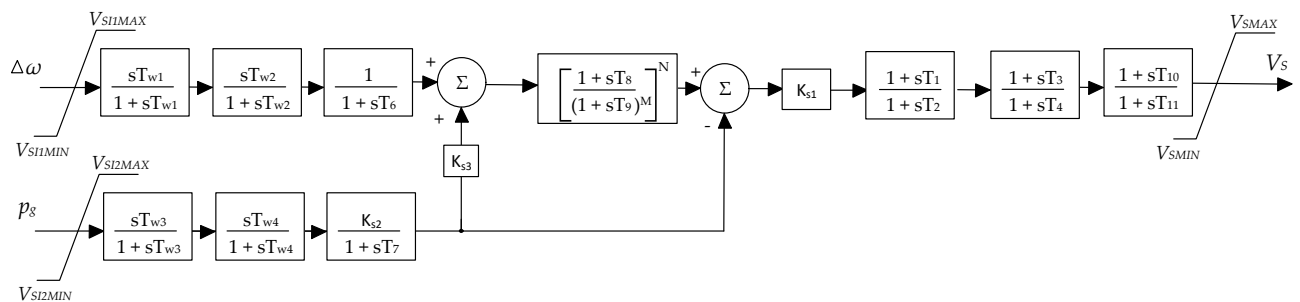
3.3 Systémový stabilizátor

Model systémového stabilizátoru je dle [7] reprezentován dvouvstupovým modelem označovaným PSS2A. Vysvětlení principu funkce systémového stabilizátoru se nachází v části 1.4.2. Blokové schéma tohoto modelu je na obrázku 3.3. Vstupním signálem uvedeného modelu je odchylka otáček generátoru $\Delta\omega$ a činný výkon generátoru P_g . Výstupem systémového stabilizátoru je velikost signálu V_s sloužící jako vstupní signál pro model buzení z 3.2.



Obr. 3.3: Blokové schéma systémového stabilizátoru PSS2A z dokumentu [7]

Z nabídky knihovny MACHINES byl použit blokový model PSS2B, který je jenž se od zastaralejšího modelu PSS2A Model systémového stabilizátoru je dle [7] reprezentován dvouvstupovým modelem označený PSS2A. PSCAD nabízí pouze model PSS2B z knihovny MACHINES, jehož přenosová funkce je znázorněna na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Blokové schéma systémového stabilizátoru PSS2B [8]

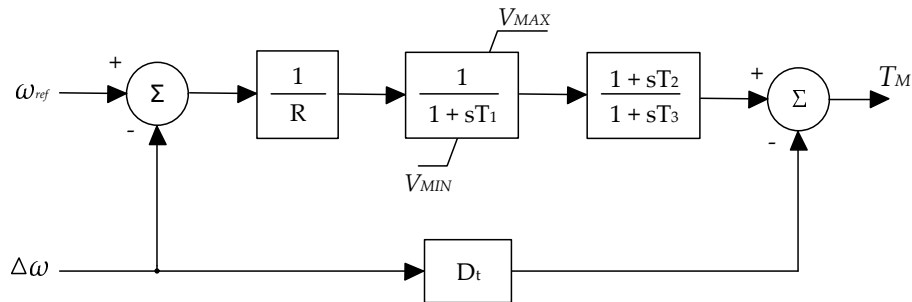
Z obrázku 3.4 lze zpozorovat požadované vstupní signály pro uvedený systémový stabilizátor, a to odchylku rotorové rychlosti $\Delta\omega$ [p.u.] a činný výkon generátoru P_{GEN} [p.u.].

Výstupem tohoto systémového stabilizátoru je velikost signálu V_S [p.u.] sloužící jako vstupní signál pro model buzení z 3.2.

Dvouvstupový systémový stabilizátor lze v programu PSCAD reprezentovat modelem PSS2B, který oproti modelu PSS2A disponuje navíc jednoduchým lead-lag členem T_{10} a T_{11} . Zanedbáním členu ($T_{10} = T_{11} = 1$) se použitý model shoduje s požadovaným modelem PSS2A. Model systémového stabilizátoru také zanedbává konstanty **M** a **N**. Meze pro tyto konstanty v PSCADu jsou v rozmezí 1 až 4, kdy při zadání nulové hodnoty vyskočí chybová hláška a hodnota se nepřepíše.

3.4 Pohon a regulace otáček

Reprezentaci turbíny a regulátoru otáček dle dokumentu [7] shrnuje blokový model TGOV1, jehož schéma je překresleno na obrázku 3.5. Model TGOV1 představuje parní turbínu s regulací otáček, mezi jehož vstupními veličinami patří odchylka rotorové rychlosti $\Delta\omega$ [p.u.] a referenční otáčky ω_{ref} [p.u.]. V případě uvažování synchronního stroje je velikost referenčních otáček ω_{ref} vždy rovna 1 p.u. Výstupem modelu TGOV1 je požadovaná hodnota mechanického výkonu turbíny T_M [p.u.].



Obr. 3.5: Blokové schéma modelu TGOV1 [7]

V knihovně MACHINES se nachází model TGOV1 skládající se z 2 bloků, a to parní turbíny a regulátoru otáček. Aby uvedené blokové modely měly ekvivalentní přenosovou funkci jako žádaný model TGOV1 z obrázku 3.5, tak byly parametry modelu TGOV1 zadávány podle tabulky 3.1 a tabulky 3.2, které vychází z dokumentu [21]. Neuvedené parametry blokového modelu turbíny byly zadáním nulové hodnoty zanedbány.

Symbol v PSCADu	KG_1	TSM_1	PUP_1	PDN_1	CMX_1	CMN_1
Zadaná hodnota dle [21]	20	0.5	10	-10	1	0

Tab. 3.1: Parametry modelu regulátoru otáček podle [21]

Symbol v PSCADu	K_1	K_3	T_5
Zadaná hodnota dle [21]	0.3	0.7	1

Tab. 3.2: Parametry modelu turbíny podle [21]

3.5 Synchronní generátor

Návrh modelu synchronního generátoru je mezi navrhovanými prvky soustavy nejpodstatnější z toho důvodu, aby chování generátoru v navržené síti probíhalo dle očekávaných předpokladů. Parametry synchronního generátoru ze zprávy [7] jsou odvozené z transformace dq0, která je známá také pod názvem Parkova transformace. Tato transformace slouží ke snazší definici synchronního generátoru. Podrobnější vysvětlení dq0 transformace lze dohledat v uvedené literatuře [5].

Parkova transformace umožňuje model synchronního generátoru nahradit na osu d,q. Parametry této transformace s českým a anglickým názvem se nachází v tabulce 2.4. Podrobnější popis modelování synchronního generátoru v simulačním programu PSCAD je uveden v kapitole 3.5.

Symbol parametru v PSCADu	Ra	Xp	Xd	Xd ₋	Tdo ₋	Xd ₋
Symbol dle tabulky 2.3	r_a	x_l	x_d	x'_d	T'_{d0}	x''_d
Symbol parametru v PSCADu	Tdo ₋	Xq	Xq ₋	Tqo ₋	Xq ₋	Tqo ₋
Symbol dle tabulky 2.3	T''_{d0}	x_q	x'_q	T'_{q0}	x''_q	T''_{q0}

Tab. 3.3: Výpis veličin pro synchronní stroj [7]

3.6 Tvrdá síť

Jako reprezentaci tvrdé byl použit model napěťovým zdrojem nazývaným Three Phase Voltage Source Model 2 ze standardní knihovny Sources. Aby do uvedeného modelu mohly být vloženy parametry tvrdé sítě z dokumentu [7], bylo provedeno následující nastavení. V záložce Configuration se volbou R-L-C typ impedance zdroje. V záložce Signal Parameters se volbou Behind Source Impedance nastavuje parametrizování napěťového zdroje velikostí napětí a fázorem vnitřní impedance. Tabulka 3.4 pak znázorňuje vkládání parametrů tvrdé sítě z dokumentu [7] do napěťového zdroje.

Symbol v PSCADu	Vm	R ₋	L ₋
Zadaná hodnota dle [7]	U	R	L

Tab. 3.4: Parametry modelu regulátoru otáček podle [7]

4 Simulace činitelů

V předchozí kapitole byl popsán postup vytvoření jednostrojového modelu v simulačním programu PSCAD. V této kapitole je pak zmíněný model použit k analyzování možných vlivů vybraných činitelů na přechodnou stabilitu, o kterých se zmiňuje kapitola 1.4.

4.1 Testovací scénář

Podstatu použitých testovacích scénářů shrnuje tabulka 4.1. Tyto scénáře byly vytvořeny takovým způsobem, aby bylo umožněno pozorovat vliv konkrétního činitele. Průběh uvedených testovacích scénářů se shoduje s 3. testovacím scénářem z přílohy A.3), který se shoduje se 4. testovacím případem.

Případ	Typ stroje	Buzení	Uvažování PSS	Uvažování odporu
1	Stroj s hladkým rotorem	Konstantní napětí	Ne	Ne
2	Stroj s vyniklými póly	Konstantní napětí	Ne	Ne
3	Stroj s hladkým rotorem	Budící systém	Ne	Ne
4	Stroj s hladkým rotorem	Budící systém	Ano	Ne
5	Stroj s hladkým rotorem	Konstantní napětí	Ne	Ano
6	Stroj s hladkým rotorem	Budící systém	Ano	Ano

Tab. 4.1: Testovací případy pro uvedenou úlohu [16]

Pro 2. testovací scénář byl použit stroj s vyniklými póly, pro který byly zvoleny hodnoty dle tabulky 4.2. Parametry neuvedené v tabulce 4.2 zůstaly nezměněné. V testovacích případech, ve kterých se systémový stabilizátor neuvažoval, byla její funkce vypnuta až po dosažení ustáleného stavu, jelikož v opačném případě dodával budící systém do generátoru oscilující budící napětí. Rezistance soustavy byla zadávána skrze model transformátoru. Jako hodnota odporu byla zvolena $R = 0.04 \Omega$, přičemž tato hodnota byla zvolena záměrně takovým způsobem, aby vliv rezistance byl v průběhu pozorovatelný. Odpor nelze zadat do modelu transformátoru zadáním přímé hodnoty, ale zadává se skrze hodnotu ztrát nakrátko v poměrných jednotkách, přičemž její hodnota se do modelu transformátoru zadá v záložce **Configuration/Copper losses**. Přepočet odporu na ztráty nakrátko vycházel ze vztahu 4.1. Pro zvolený odpor $R = 0.04 \Omega$ vychází hodnota ztrát nakrátko $\Delta P_0 = 0.045$ p.u.

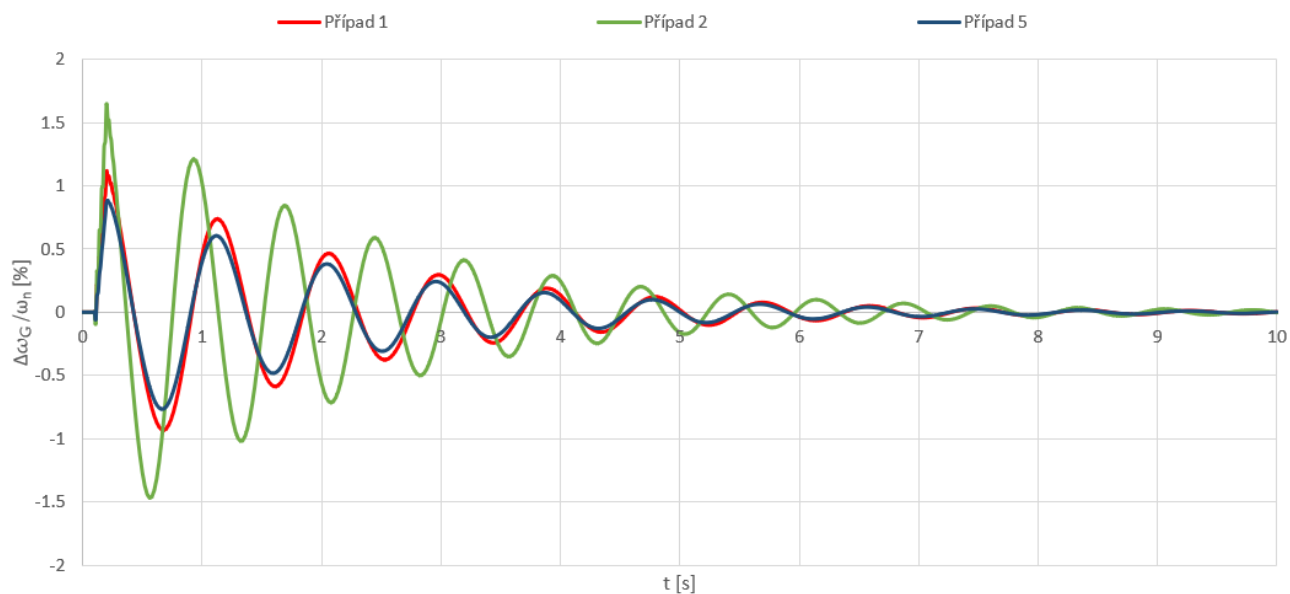
$$\Delta P_0 = \frac{R \cdot S_n^2}{U^2} \quad (4.1)$$

Veličina dle tabulky 2.3	x_d	x'_d	x''_d	x_q	x'_q	x''_q	H
Symbol parametru v PSCADu	1.305	0.296	0.252	0.474	0.474	0.283	2.7

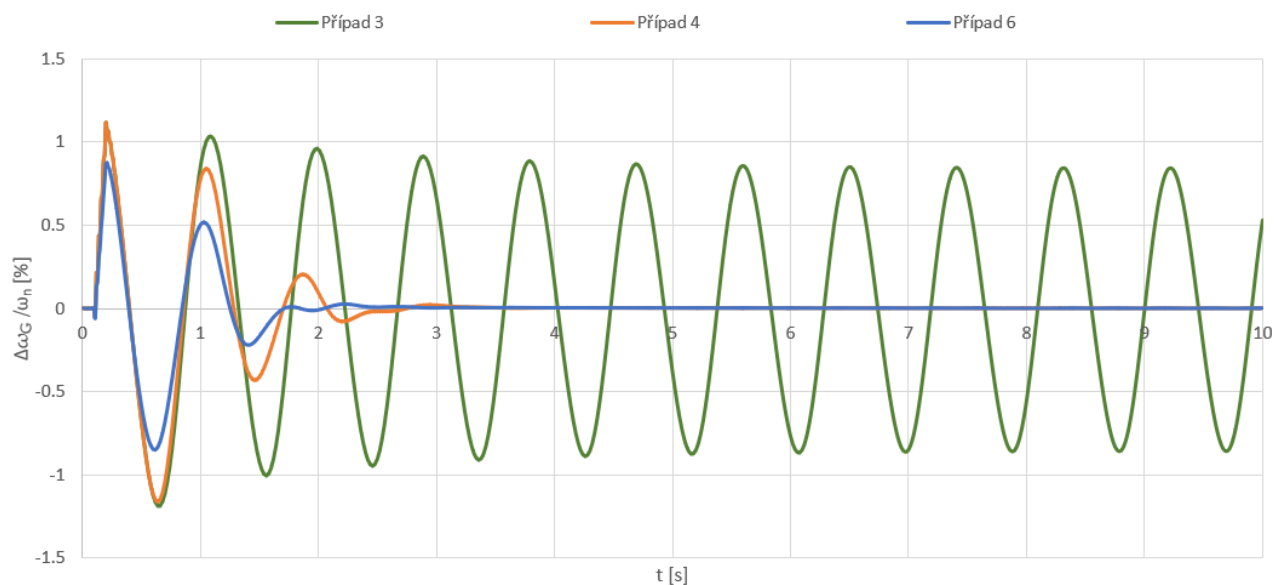
Tab. 4.2: Výpis veličin pro synchronní stroj [7]

4.2 Průběhy otáček

Pro ilustrování vlivů činitelů na přechodnou stabilitu byl jako sledovaný průběh zvolen poměr rozdílu otáček generátoru vůči jmenovitým otáčkám $\Delta\omega_G/\omega_{ref}$. Pro přehlednost byly průběhy rozdílů rozděleny do 2 obrázků, a to do obrázku 4.1 a 4.2. Rozdělení průběhů neproběhlo náhodně, naopak se tak lépe porovnávají konkrétní činitele.



Obr. 4.1: Průběhy testovacích scénářů č.1, 2 a 5 z tabulky 4.1



Obr. 4.2: Průběhy testovacích scénářů č.3, 4 a 6 z tabulky 4.1

4.3 Vyhodnocení průběhů

Vliv systémového stabilizátoru na přechodnou stabilitu lze pozorovat porovnáním případu 3 a 4 na obrázku 4.2, kdy průběh rozdílu otáček v případě 3 se po uplynutí 10 s pohybuje okolo hodnoty 0.8 %, zatímco v případě 4 systémový stabilizátor tlumí oscilaci způsobenou trojfázovým zkratem přibližně po 3 s. Tento závěr koresponduje s kapitolou 1.4.2, že funkce systémového stabilizátoru má pozitivní účinek na přechodnou stabilitu.

Uvažování rezistance v soustavě je pozorovatelný porovnáním průběhů případu 1 a 5 z obrázku 4.1, ale i také z průběhů případu 4 a 6 z obrázku 4.2. Jejich porovnáním lze pozorovat, že průběhy případů uvažující odpor soustavy dosahují nižších amplitud než srovnávané případy neuvažující odpor. Tento závěr tak odpovídá kapitole 1.4.6, kde se uvádí, že počítání s rezistancí soustavy má kladný účinek na přechodnou stabilitu. Je však nutné podotknout, že rezistance reálné soustavy nedosahuje vysokých hodnot jako uvažované případy.

Vliv stroje s vyniklými póly ilustruje srovnání průběhů případu 1 a 2 z obrázku 4.1. Toto porovnání však mnoho nevypovídá o samotném typu stroje, jelikož použité hodnoty mechanické časové konstanty se lišily. Srovnáním uvedených průběhů lze však udělat závěr, že synchronní stroje s větším jmenovitým výkonem S_n , a tedy i větší mechanickou časovou konstantou T_m , jsou méně náchylné na přechodné jevy, respektive dochází k méně výraznému kývání stroje.

Pozorovat vliv budícího systému na přechodnou stabilitu nelze jednoduše vyčíst z průběhů otáček, jelikož porovnáním případů 2 a 4 lze dojít k závěru, že použití samotného budícího systému má negativní účinek na stabilitu systému. Pozitivní účinek je však pozorovatelný zkoumáním mezní doby trvání zkratu t_k , přičemž toto zkoumání bylo provedeno v simulačním programu MODES. Z Výsledku uvedeného zkoumání vyplývá, že v případě uvažování budícího systému generátor odolá delšímu působení zkratu než při uvažování konstantního napětí.

Výsledky výše popsané analýzy potvrdily teoretický předpoklad, že pro přesnější výsledky simulování přechodné stability je nutné zmiňované činitele uvažovat.

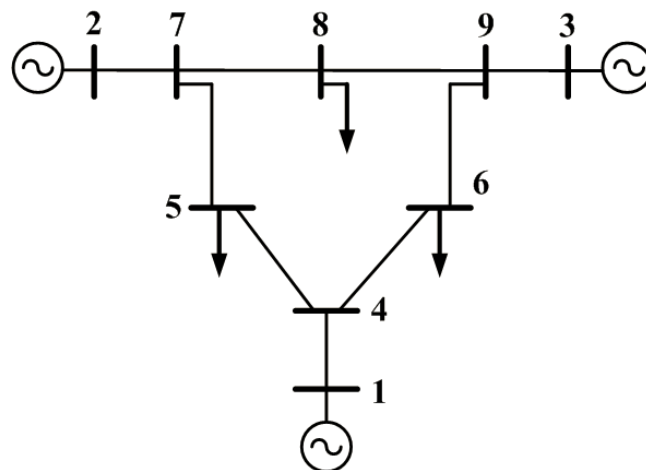
5 Vícestrojový model IEEE9

Tato kapitola představuje vícestrojový model IEEE9. Dále v této kapitole je popsáno, jakým způsobem byly implementovány data z referenčního dokumentu do simulačního softwaru PS-CAD. Sestavený model bude využit pro simulace v další části práce.

5.1 Refereční model

Pro analyzování přechodné stability ve vícestrojové soustavě je zpravidla využíván devítiuzlový model IEEE 9 skládající se ze tří vzájemně propojených generátorů. Jednopolové schéma ilustruje obrázek 5.1. Uvedené publikace [28]-[30] zabývající se přechodnou stabilitou používají model IEEE9, jehož dynamická data vychází z knihy [25]. Uvedená publikace nabízí dynamická data a podrobný popis uvedeného síťového modelu. Úskalím tohoto modelu je však používání klasického modelu generátoru, jehož používání není vhodné pro analyzování síťových modelů o velkém počtu synchronních strojů.

Pro vytvoření modelu IEEE9 byla použita jako reference dokumentace [23]-[24] z univerzity v Illinois s modifikovanými daty, ve kterém jsou generátory reprezentovány Parkovou transformací. Ačkoliv byl popsán model vytvořen v různých simulačních programech, tak při přesném dodržování modelování dle dokumentace [23]-[24] vytvořený model nedosahoval ustáleného chodu. Z tohoto důvodu bylo přikročeno k modifikaci parametrů z referovaných dokumentů. V následujících odstavcích je tak kromě samotného modelování uvedeno, jakým způsobem se vytvořený model liší od reference.



Obr. 5.1: Schéma sítě IEEE 9 [12]

5.2 Modelování synchronního generátoru

Dle reference je použitý model synchronního generátoru s názvem GENROU. Podrobný matematický model je popsán v dokumentu [19]. Tento model je velmi podobný Parkově transformaci, proto byl použit model podrobně popsáný v 2.5. Za inicializační hodnoty dodávaných činných a jalových výkonů generátorů byly zvoleny hodnoty vycházející z ustáleného chodu podle tabulky

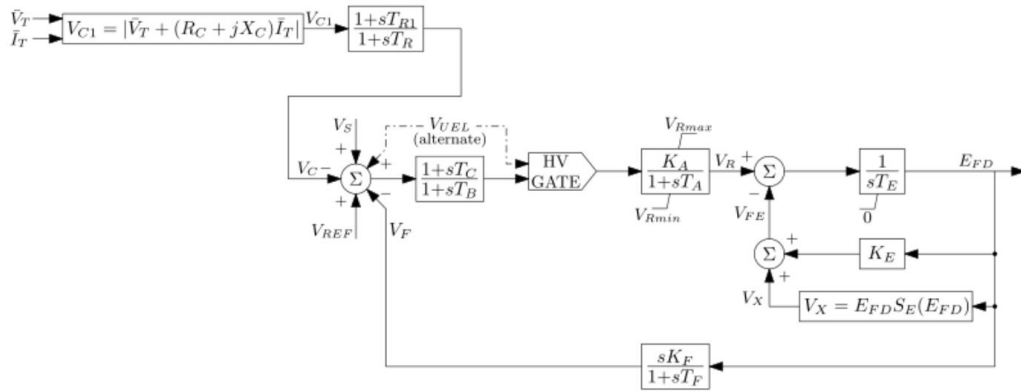
5.1.

Blok	Generátor 1	Generátor 2	Generátor 3
Činný výkon P [MW]	72	163	85
Jalový výkon Q [MVar]	27	7	-11

Tab. 5.1: Load flow modelu IEEE9 dle [23]

5.3 Modelování buzení

Dle dokumentace [23] je budicí systém reprezentován modelem IEEE1, který dle standardu IEEE [9] odpovídá modelu označovaném jako DC1A, který představuje stejnosměrný budič s regulátorem. V PSCADu lze model DC1A dohledat v knihovně MACHINES. Blokové schéma modelu DC1A je znázorněno na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Blokové schéma modelu buzení DC1A [8]

Z obrázku 5.2 je patrné, že model DC1A disponuje 3 vstupními signály. a to výstupním signálem ze systémového stabilizátoru V_S [p.u.], žádanou velikostí napětí V_{REF} [p.u.] a signálem představující kompenzaci vlivu externí reaktance (touto problematikou se podrobněji zabývá například [9]). Do připraveného blokového modelu DC1A byly vkládány hodnoty podle tabulky 5.2, přičemž číselné hodnoty parametrů se nachází v tabulce B.2.

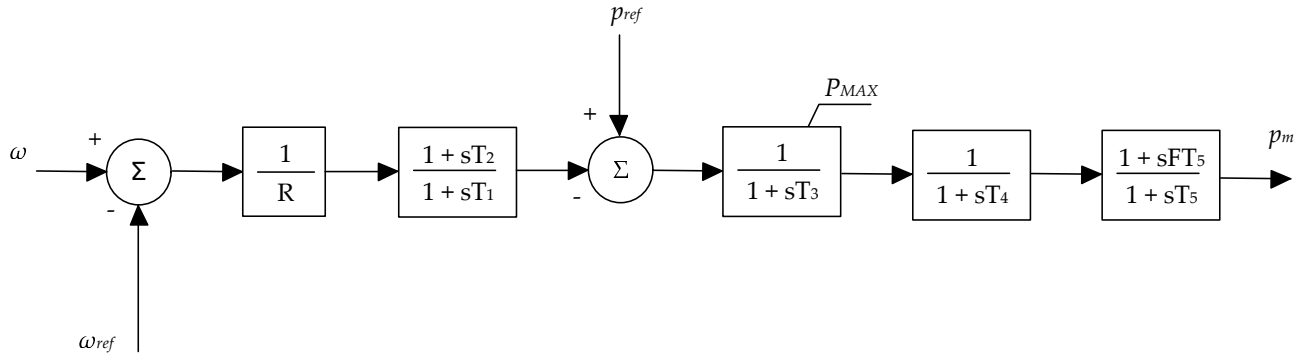
Připravený model DC1A skýtá některá úskalí, které je nutné uvažovat. Jedním z nich je, že nelze opomenout funkci sycení/saturation. Pokud uživatel zadá nulové hodnoty konstant představující sycení $SE[EF_D]$, tak před zahájením simulace vyskočí chybová hláška o záporné saturaci. Z tohoto důvodu byly zadány takové hodnoty, které funkci sycení zanedbávají. Druhým úskalím je v nemožnosti zadat číselnou hodnotu zesílení budiče K_e . Uživatel může pouze zvolit způsob buzení, a to buď samobuzení ($K_e = 0$) nebo separately ($K_e = 1$). (podrobněji se o této problematice zmiňuje standard IEEE [9]).

Symbol v PSCADu	RC	XC	TR	TC_1	TB_1	KA_1
Zadaná hodnota	0	0	T_r	0	0	K_a
Symbol v PSCADu	TA_1	VRMX_1	VRMN_1	TE_1	KE_1	SE1_1
Zadaná hodnota	T_a	V_{Rmax}	V_{Rmin}	T_e	K_e	$S_E(E_1)$
Symbol v PSCADu	EF1_1	SE2_1	EF2_1	KF_1	TF_1	
Zadaná hodnota	E_1	$SE(E_2)$	E_2	K_f	T_f	
Pozn.: Tučně označené parametry označují číselné hodnoty z tabulky B.2						

Tab. 5.2: Zadané parametry modelů budícího systému pro model IEEE9

5.4 Modelování turbíny a regulátoru otáček

Referovaný dokument [24] používá pro modelování turbíny a regulátoru otáček model BPA GG, jehož schéma je převzato z [14] a překresleno na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Blokové schéma modelu regulátoru otáček BPA GG

Z obrázku 5.3 je patrné, že uvedený model disponuje 3 vstupními veličinami, a to hodnotou otáček generátoru ω [p.u.], jmenovitou hodnotou otáček ω_{ref} [p.u.] a požadovaným činným výkonem generátoru p_{ref} [p.u.]. Výstupní veličinou je mechanický výkon p_m [p.u.], kterou má pohon stroje turbína dodávat skrze hřídel generátoru.

Žádný z připravených modelů turbíny a regulátoru otáček v knihovně MACHINES nedisponuje přenosovou funkcí shodující se s modelem BPA GG. Z tohoto důvodu byl požadovaný model vytvořen skrze jednotlivé bloky z knihovny CSMF. Hodnoty jednotlivých proměnných vychází z dokumentu [23] a jsou vypsány v tabulce B.3.

Pro synchronní stroj vždy odpovídá jmenovitá hodnota otáček ω_{ref} hodnotě 1 p.u. Hodnoty požadovaného činného výkonu generátoru p_{ref} vycházejí z výkonových toků ustáleného chodu, jehož hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1. Pro konkrétní blok vztažená ke zdánlivému výkonu konkrétního bloku, přičemž použité hodnoty činného výkonu generátoru p_{ref} jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Blok	Generátor 1	Generátor 2	Generátor 3
p_{ref} [-]	0.1406	0.6037	0.68

Tab. 5.3: Hodnoty synchronního stroje s vyniklými póly 2.testovacího scénáře

5.5 Modelování vedení

Pro modelování vedení byl použit blokový model π -článku popsáný v kapitole 2.1. Parametry vedení z dokumentu [23] byly přepočteny na skutečné hodnoty R , X_l a X_C , přičemž pro zadání uvedených parametrů je nutné v nastavení blokovém modelu π -článku **Main Configuration** zvolit R, X_l, X_c [Ohm]. Zadávání parametrů do blokového modelu vedení znázorňuje tabulka 5.4, přičemž přepočtené parametry vedení se nachází v tabulce B.4.

Symbol v PSCADu	F	len	Rp	Xp	Bp	Rz	Xz	Bz
Zadaná hodnota	f_n	1 m	r_1	x_1	b_1	r_0	x_0	b_0

Tab. 5.4: Ekvivaletní zobrazení veličin pro model vedení v programu PSCAD

5.6 Modelování transformátoru

Model blokového transformátoru byl již popsán v kapitole 2.2. Zde stačí uvést, že použité parametry byly převzaty z modelu [16]. Použité transformátory byly převzaty z [16].

Kromě uvedených blokových transformátorů byly do modelu sítě přidány další 3 transformátory umístěné mezi modelem generátoru a blokovým transformátorem. Tyto transformátory jsou modelovány totožným způsobem jako výše uvedené blokové transformátory. Má se jednat o ideální transformátory, avšak PSCAD vyžaduje zadání hodnoty reaktance, v opačném případě by se nespustila simulace, proto byla zadána hodnota reaktance $x = 0.0001$ p.u.

6 Simulace přechodné stability ve vícestrojové soustavě

Tato kapitola vyhodnocuje přechodnou stabilitu systému skrze analýzu zátěžných úhlů generátorů v modelu IEEE9 popsáném v kapitole 5. Pro analýzu vzájemných zátěžných úhlů generátorů síťového modelu byly použity dvě metody, které jsou uvedené níže. Kapitola nejprve představuje použitý testovací scénář. Následně jsou představeny průběhy zátěžných úhlů získané z programu PSCAD, které jsou posléze vyhodnocovány.

6.1 Testovací scénář

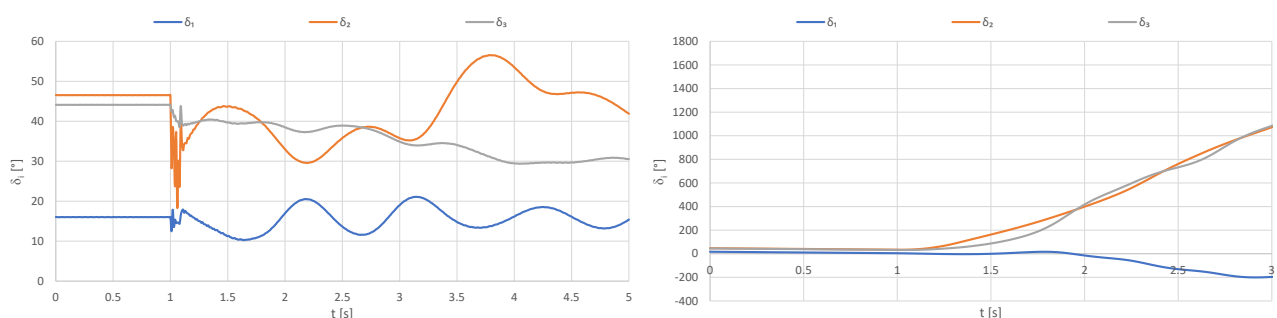
První testovací scénář vychází z publikace [25], kdy v čase $t = 1$ s vznikla na uzlu 5 třífázový zkrat. Po uplynutí 5 period (v případě frekvence síťového modelu $f_n = 60$ Hz činí 5 period 0.083 s) je uvedená porucha odstraněna rozpojením vedení 5-7. Další zásah do modelu nebyl prováděn. Druhý testovací scénář se od prvního liší dobou trvání zkratu, kdy ke odstranění poruchy dochází za 0.3 s od vzniku poruchy. Sledovaný časový úsek pro první scénář byl stanoven na 5 s, zatímco pro druhý scénář byl z důvodu přehlednosti zkrácen na 3 s.

Pro oba uvedené testovací případy byly použity obě metody vyhodnování zátěžných úhlů popsané v kapitole 1.5.

Dále byla vyhledávána mezní doba trvání zkratu t_k . Hodnota této doby byla získána iteračním způsobem, kdy byla hledána taková hodnota t_k , pro kterou po odeznění poruchy měřené zátěžné úhly nebylo dosaženo stabilního chodu soustavy, kdy jeden z generátorů vypadl ze synchronismu.

6.2 Průběhy vzájemných zátěžných úhlů

Průběhy jednotlivých zátěžných úhlů generátorů pro oba scénáře ilustrují obrázek 6.1. PSCAD vyhodnocuje zátěžný úhel v radiánech, přičemž pro přehlednost byly průběhy převedeny na stupně.

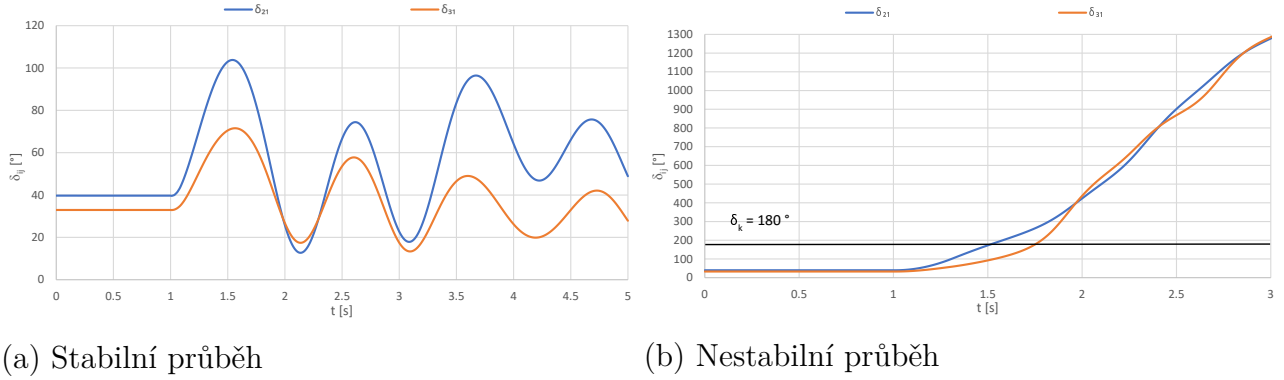


(a) Stabilní průběh

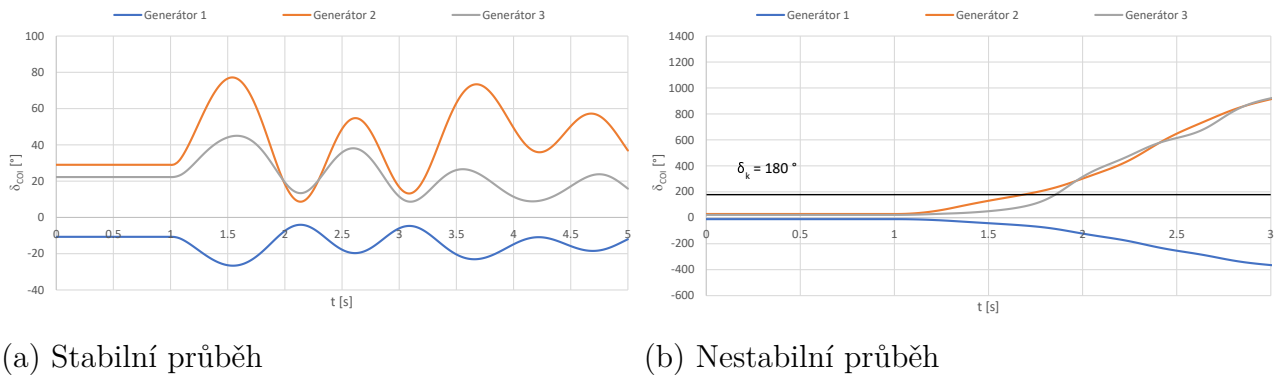
(b) Nestabilní průběh

Obr. 6.1: Průběhy jednotlivých zátěžných úhlů generátorů při zkratu v uzlu 5

Obrázek 6.2 ilustruje průběhy zátěžných úhlů generátoru 2 a 3 vztahené k referenčnímu generátoru 1. Průběhy byly získány podle vztahu 1.5. Obrázek 6.3 ilustruje průběhy zátěžných



Obr. 6.2: Průběhy zátěžných úhlů vztažených ke generátoru 1 při zkratu v uzlu 5



Obr. 6.3: Průběhy zátěžných úhlů vztažených k referenčnímu středu při zkratu v uzlu 5

úhlů generátorů vztažené k referenčnímu středu δ_{COI} . V PSCADu byly průběhy získány aplikováním vztahů 1.6 a 1.9 skrze blokové modely CSMF. K obrázkům 6.2b a 6.3b byla přidána mez představující kritický úhel δ_k , jejíž hodnota byla na základě kapitoly 1.5 zvolena 180° .

6.3 Vyhodnocení průběhů

Výsledné průběhy nemohly být referovány k výsledkům z dokumentu [25] z důvodu již zmíněných rozdílů vytvořeného modelu oproti referovanému dokumentu.

Stabilní přechod testovacího scénáře lze pozorovat z obrázku 6.1a, kdy po odstranění poruchy došlo k oscilacím, které následovně odeznívaly. Jako pozoruhodné lze označit fakt, že po odeznění oscilací dochází k poklesu zátěžného úhlu generátoru 2 a 3. Stejný přechod ilustrují i obrázky 6.2a a 6.3a, kdy maximální hodnoty zátěžného úhlu δ_{max} dosáhl generátor 2, přičemž zátěžný úhel vztažený ke generátoru 1 δ_{21} dosáhl hodnoty 104° a zátěžný úhel vztažený k referenčnímu středu δ_2 dosáhl hodnoty 77° . Důvod větších oscilací u generátoru 2 spočívá v místě vzniku zkratu, kdy vytvořený zkrat je ke generátoru 2 elektricky blíže než ke generátoru 3.

Nestabilní průběh ilustruje obrázek 6.1b, kdy hodnoty zátěžné úhly generátorů 2 a 3 strmě narůstají a následně vypadávají ze synchronismu následovaný generátorem 1. Z obrázků 6.2b a 6.3b lze pro definovaný kritický úhel $\delta_k = 180^\circ$ určit momenty, kdy u generátorů dochází k vypadnutí ze synchronismu. Pro metodu uvažující za referenci generátor 1 je pro generátor 2 1.5 s a pro generátor 3 1.75s. U metody COI je pro generátor 2 1.625 s a pro generátor 3 činí

1.83 s.

Pro vytvořený model byl na základě iterační metody zjištěna hodnota mezní doby trvání zkratu t_k , a to 0.23 s. Pokud by porucha z uváděného testovacího scénáře nebyla do této doby odstraněna, pak následuje výpadek generátorů ze synchronismu.

Závěr

Tato práce se zabývala přechodnou stabilitou na vytvořených síťových modelech v simulačním programu PSCAD. V práci je obecně vysvětlen princip stability elektrizační soustavy a také princip vyhodnocování přechodné stability elektrizační soustavy. V práci byl popsán postup při vytváření síťových modelů, a to konkrétně SMIB a IEEE9. Na těchto modelech byly vytvořeny testovací scénáře, na kterých byla ukázána metodika zkoumání přechodné stability. Ve čtvrté kapitole bylo na jednostrojovém modelu pro jeho jednoduchost zkoumán vliv vybraných činitelů na přechodnou stabilitu. Výsledky této analýzy potvrdily teoretický předpoklad, že pro přesnější výsledky analýzy přechodné stability je nutné zmiňované činitele uvažovat. Je však nutné dodat, že jejich vliv se zdá být zanedbatelný a v reálné vícestrojové soustavě by tento vliv nebyl pozorovatelný.

Na modelu vícestrojové stability byly sledovány zátěžné úhly generátorů při přerušení vedení, přičemž vyhodnocování zátěžných úhlů bylo prováděno metodami, které byly následně porovnány. Z výsledků lze konstatovat, že při použití první metody je uvedená porucha dříve odhalena než v druhém případě. Je však nutné podotknout, že vytvořený model se neztotožňuje s referenčním modelem IEEE9. Jako předmět dalšího zkoumání se nabízí srovnání vytvořeného vícestrojového modelu s jinými simulačními programy, čímž by se mohl vytvořený model validovat.

Použitá literatura

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [3] MACHOWSKI, Jan, Janusz W. BIALEK a J. R. BUMBY. *Power system dynamics: stability and control*. 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-72558-0.
- [4] HODINKA, Miloslav. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1983.
- [5] KUNDUR, P., Neal J. BALU a Mark G. LAUBY. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, c1994. ISBN 00-703-5958-X.
- [6] KUNDUR, P. a kol. *Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions*. In: IEEE Transactions on Power Systems. 2004, 19(3), s. 1387-1401. DOI: 10.1109/TPWRS.2004.825981. ISSN 0885-8950. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1318675/>>
- [7] *Documentation on controller tests in test grid configurations*, ENTSO-E SG SPD Report 2013. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/RG_SOC_CE/131127_Controller_Test_Report.pdf>
- [8] *Synchronous Machine Excitation System Vision Dynamical Analysis: Manual* Netherlands: Phase to Phase BV, 2016. Dostupné z: <<https://phasetophase.nl/pdf/SynchronousMachineExcitationSystems.pdf>>
- [9] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies* IEEE Std 421.5-2005.
- [10] *PSCAD X4 (v4.6) Online Help* [online]. Manitoba Hydro International, 2018 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <<https://hvdc.ca/webhelp/ol-help.htm>>
- [11] *PSCAD Cookbook: Synchronous Machine Studies* [online]. Manitoba HVDC Research Centre, 2013 [cit. 2020-01-21] Dostupné z: <<https://hvdc.ca/knowledge-base/read,article/291/chapter-10-synchronous-machine/v:>>>
- [12] SONG, Yue, David J. HILL a Tao LIU. Small-disturbance angle stability analysis of microgrids: A graph theory viewpoint In: *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 201-206 [cit. 2020-01-22]. DOI: 10.1109/CCA.2015.7320633. ISBN 978-1-4799-7787-1. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7320633>>
- [13] SAUER, P. W. a M. A. PAI. *Power system dynamics and stability*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998. ISBN 0136788300.

-
- [14] Governor BPA GG. *PowerWorld Corporation* [online]. 2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.powerworld.com/WebHelp/Content/TransientModels_PDF/Generator/Governor/Governor%20BPA%20GG.pdf>
- [15] RAI, Jitendra Nath a Ajendra SINGH. Combined cycle gas turbine and generator matching performance. In: *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. IEEE, 2016, 2016, s. 1-6. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853374. ISBN 978-1-4673-8587-9. Dostupné také z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7853374/>>
- [16] IEEE 09 Bus System. *Manitoba Hydro International Ltd.* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <<https://www.pscad.com/knowledge-base/article/25>>
- [17] PSCAD: IEEE 09 Bus System. *Manitoba Hydro International Ltd.* [online]. 2018 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/uploads/knowledge_base/ieee_9_bus_technical_note.pdf>
- [18] IEEE 9-bus modified test system. *Dynamic IEEE test systems* [online]. Kypr: KIOS University of Cyprus [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <<https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/index.php/dynamic-ieee-test-systems/ieee-9-bus-modified-test-system>>
- [19] WEBER, James. Description of machine models GENROU, GENSAL, GENTPF and GENTPJ. In: *PowerWorld Corporation* [online]. 2015 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <<https://www.powerworld.com/files/GENROU-GENSAL-GENTPF-GENTPJ.pdf>>
- [20] MÁŠLO K. *Popis modelování přechodných dějů v ES programem MODES v.2.3./15*. 2015
- [21] MÁŠLO K. *SMIB SPD: Testování budičů a turbín na jednoduchém modelu generátor – tvrdá síť*. 2018 [cit. 2020-05-24] Dostupné z: <<http://www.ueen.feec.vutbr.cz/index.php/cs/studium-a-vyuka/testovaci-modely/91-test-model-1>>
- [22] WSCC 9-Bus System. *Information Trust Institute* [online]. Urbana: University of Illinois, 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <<https://icseg.itl.illinois.edu/wsc-9-bus-system/>>
- [23] *IEEE 9 Bus System Example* [online]. OPAL-RT Corporate Headquarters, 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf>
- [24] *IEEE 9-BUS MODIFIED TEST SYSTEM DATA* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <<https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE%209.pdf>>
- [25] ANDERSON, Paul M. a A.A FOUAD. *Power System Control and Stability: Revised printing*. New York: IEEE Press, 1993. ISBN 07-803-1029-2.

-
- [26] MORALES, Juan D., Jovica V. MILANOVIC a Panagiotis N. PAPADOPOULOS. Analysis of Angular Threshold Criteria for Transient Instability Identification in Uncertain Power Systems. *2019 IEEE Milan PowerTech* [online]. IEEE, 2019, 2019, , 1-6 [cit. 2020-05-30]. DOI: 10.1109/PTC.2019.8810465. ISBN 978-1-5386-4722-6. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8810465/>>
- [27] ROVNYAK, S. M., M. N. NILCHI, D. W. LONGBOTTOM a D. C. VASQUEZ. Angle stability predictive indices. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting* [online]. IEEE, 2012 [cit. 2020-05-30]. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6344976. ISBN 978-1-4673-2729-9. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6344976/>>
- [28] DONG, Zhao Yang, Jun Hua ZHAO a David J. HILL. Numerical Simulation for Stochastic Transient Stability Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems* [online]. 2012, 27(4), 1741-1749 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2187466. ISSN 0885-8950. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6171893/>>
- [29] Yorino et al.: A new method for obtaining critical clearing time for transient stability, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, No. 3, Pp. 1620 – 1626, Aug. 2010. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5419951/>>
- [30] CAI, H.R., C.Y. CHUNG a K.P. WONG. Application of Differential Evolution Algorithm for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems* [online]. 2008, 23(2), 719-728 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919241. ISSN 0885-8950. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4487649/>>
- [31] TLUSTÝ, J. a kol. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.

Seznam příloh

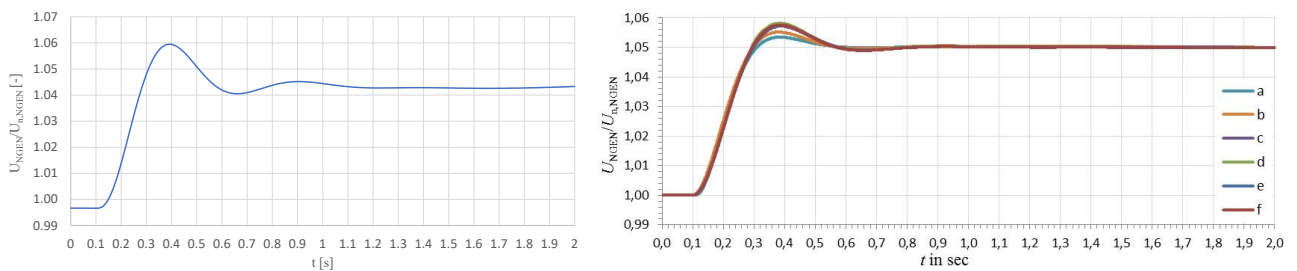
Validace modelu SMIB	55
Hodnoty pro IEEE9	58

A Validace modelu

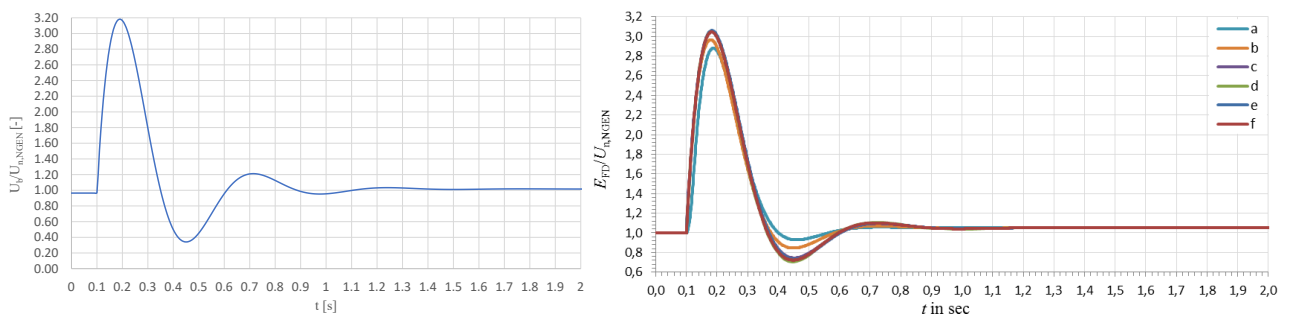
K validaci modelu SMIB slouží testovací scénáře obsažené v referenčním dokumentu [7]. Tyto testovací scénáře byly definovány za účelem představení dynamického chování synchronního stroje a regulátorů. V této kapitole je popsán princip jednotlivých testovacích scénářů a následně jsou zhodnoceny srovnávány průběhy vybraných veličin. Obrázky vykreslených průběhů sestávají z 2 grafů, a to z průběhu získaného simulací na vytvořeném modelu (graf ležící na levé straně obrázku) a z průběhu referenčního dokumentu (graf ležící na pravé straně obrázku).

A.1 1. testovací scénář

1. testovací scénář má za cíl sledovat dynamické chování synchronního stroje a budicího systému. skrze budicí a svorkové napětí. Scénář požaduje chod naprázdno, kterého je dosaženo roze-pnutím spínače S-GEN. V čase $t = 0,1$ s se referenční napětí U_{ref} skokově zvýší o 5 %, přičemž je sledována změna svorkového napětí na obrázku A.1 a budicího napětí na obrázku A.2. Pozorováním obou průběhů si lze povšimnout odchylky o hodnotě 0.003 p.u. Tuto odchylku lze vysvětlit skrze nenulový tok činného a jalového výkonu v modelu, ačkoliv pracuje generátor v chodu naprázdno.



Obr. A.1: Porovnání průběhů budicího napětí pro 1. testovací scénář



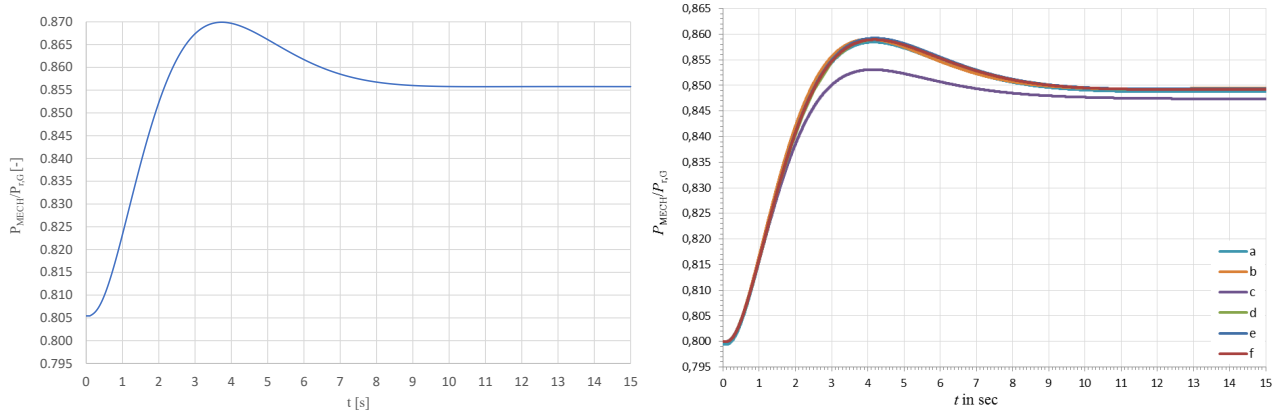
Obr. A.2: Porovnání průběhů svorkového napětí pro 1. testovací scénář

A.2 2. testovací scénář

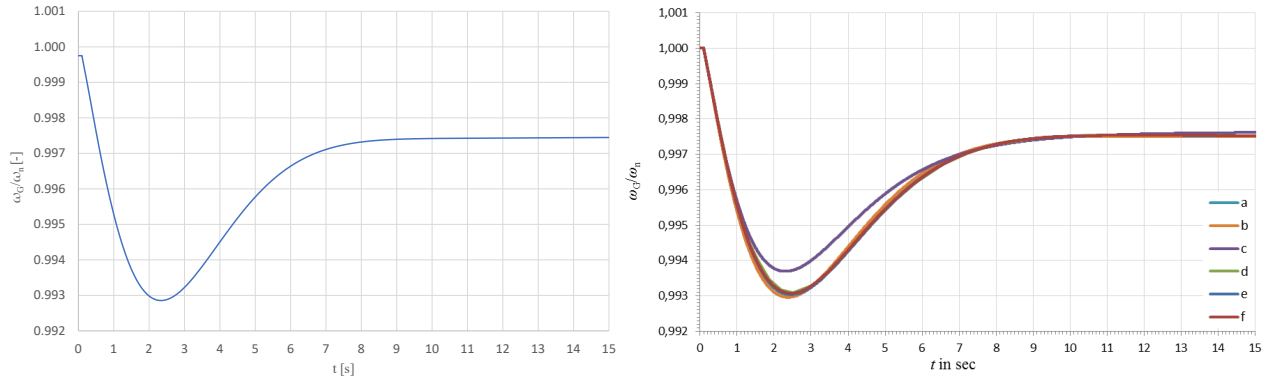
2. testovací scénář má za cíl sledovat dynamické chování synchronního stroje a regulátor otáček. Stejně jako v případě 1. testovacího scénáře je i zde roze-pnutý spínač S-GEN oddělující generátor od tvrdé sítě. Na rozdíl od 1. scénáře je v 2. testovacím scénáři přidána k uzlu generátoru zátěž,

jejíž model je popsán v 2.3. Z důvodu nežádoucího vlivu systémového stabilizátoru není v tomto scénáři její funkce zahrnuta.

Inicializační svorkové napětí je na hodnotě $1 p.u.$ a inicializační činný výkon zátěže je stanoven na $P_L = 0.8 \cdot S_{r,G} \cdot \cos\phi_r = 380 \text{ MW}$ V čase $t = 0,1 \text{ s}$ se zvýší odběr zátěže o hodnotu $\Delta P_L = 0.05 p.u.$ vztaženou k jmenovitému činnému výkonu $P_{r,G} = S_{r,G} \cdot \cos\phi_r$, tedy $23,75 \text{ MW}$. Mezi sledované průběhy v 2. scénáři patří mechanický výkon P_L na obrázku A.3 a otáčky generátoru ω_G na obrázku A.4. Jako v případě 1.scénáře i u tohoto scénáře lze pozorovat mezi průběhem vytvořeného modelu a průběhem z referenčního dokumentu odchylku.



Obr. A.3: Porovnání průběhů mechanického výkonu pro 2. testovací scénář



Obr. A.4: Porovnání průběhů otáček generátoru 2. testovací scénář

A.3 3. testovací scénář

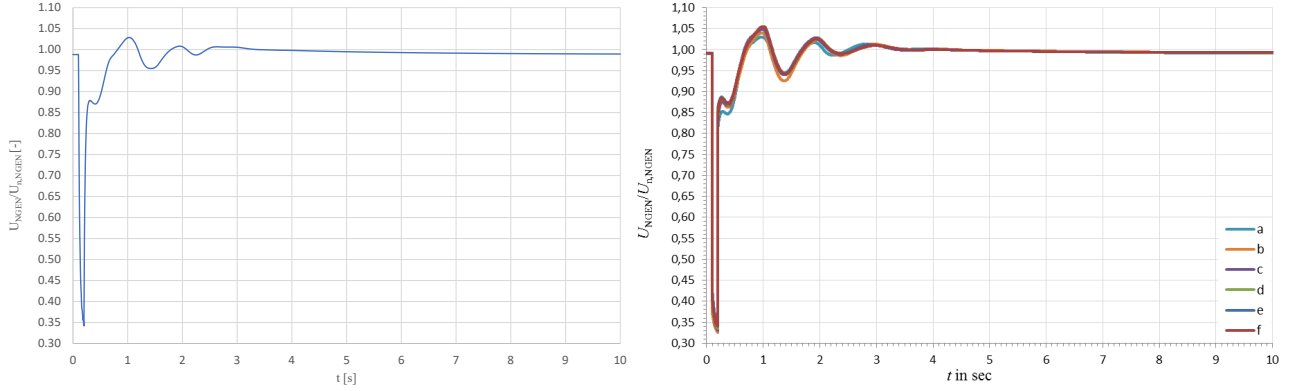
3. testovací scénář představuje dynamické chování synchronního stroje se všemi regulátory během trojfázového zkratu. Jako inicializační hodnoty pro 3. testovací scénář jsou použity hodnoty vyplývající z toku zatížení z dokumentace [7]. V čase $t = 0,1 \text{ s}$ nastává na straně vyššího napětí transformátoru v uzlu NTHV trojfázový zkrat o době trvání $0,1 \text{ s}$.

Na obrázku A.5 je patrný pokles svorkového napětí generátoru U_{GEN} . Tento pokles však nedosahuje nulových hodnot, jelikož vytvořený zkrat se nachází za blokovým transformátorem. Na obrázku A.6 lze pak pozorovat otáčky generátoru ω_G , které se ustálí na jmenovitou hodnotu

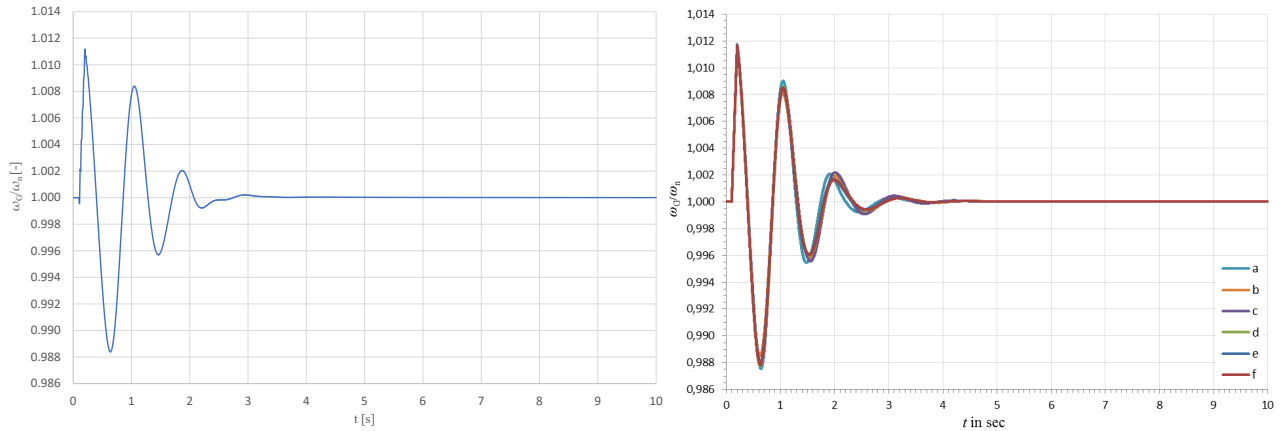
1 p.u. po přibližně 3 s po odeznění poruchy. Důvodem tohoto ustálení je funkce systémového stabilizátoru, kdy v případě vypnuté funkce systémového stabilizátoru by vytvořené oscilace nebyly tlumeny.

Na rozdíl od předešlých dvou scénářů se představené průběhy hodnotově shodují.

Z výše uvedených výsledků testovacích scénářů lze říci, že vytvořený model přibližně odpovídá referenčnímu dokumentu [7] a lze na tomto modelu provádět analyzování dynamického chování.



Obr. A.5: Porovnání průběhů svorkového napětí pro 3. testovací scénář



Obr. A.6: Porovnání průběhů otáček generátoru pro 3. testovací scénář

B Hodnoty pro IEEE9

Celý název	Veličina		G1	G2	G3
Jmenovitý zdánlivý výkon	S_n	MVA	512	270	125
Jmenovité napětí	U_n	kV	24	18	15.5
Jmenovitý účinník	$\cos\varphi_n$	-	0.9	0.85	0.85
Časová mechanická konstanta	H	s	2.6312	4.1296	4.768
Koeficient tlumení	D	p.u.	0	0	0
Odpor vinutí kotvy	r_a	p.u.	0.004	0.0016	0.004
Synchronní reaktance v podélné ose	x_d	p.u.	1.7	1.7	1.22
Přechodná reaktance v podélné ose	x'_d	p.u.	0.27	0.256	0.174
Rázová reaktance v podélné ose	x''_d	p.u.	0.2	0.185	0.134
Synchronní reaktance v příčné ose	x_q	p.u.	1.65	1.62	1.16
Přechodná reaktance v příčné ose	x'_q	p.u.	0.47	0.245	0.25
Rázová reaktance v příčné ose	x''_q	p.u.	0.2	0.185	0.134
Potierova reaktance	x_l	p.u.	0.16	0.155	0.008 ^a
Přechodná časová konstanta v podélné ose	T'_{d0}	s	3.8	4.8	8.97
Rázová časová konstanta v podélné ose	T''_{d0}	s	0.01	0.01	0.033
Přechodná časová konstanta v příčné ose	T'_{q0}	s	0.48	0.5	0.5
Rázová časová konstanta v příčné ose	T''_{q0}	s	0.0007	0.0007	0.07
Saturace při hodnotě napětí 1.0 p.j.	$S(1.0)$	-	0.09	0.125	0.1026
Saturace při hodnotě napětí 1.2 p.j.	$S(1.2)$	-	0.4	0.45	0.432
^a Původní hodnota 0.0078 způsobila chybu v simulaci					

Tab. B.1: Hodnoty generátorů [23]

Celý název	Veličina		G1	G2	G3
Časová konstanta vstupního filtru regulátoru	T_r	s	0	0	0.06
Zesílení regulátoru buzení	K_a	p.u.	200	30	25
Časová konstanta regulátoru buzení	T_a	s	0.395	0.4	0.2
Maximální hodnota výstupu regulátoru	V_{Rmax}	p.u.	3.84	4.59	1
Minimální hodnota výstupu regulátoru	V_{Rmin}	p.u.	-3.84	-4.59	-1
Samobuzení	K_e	p.u.	1	0	0
Časová konstanta budiče	T_e	s	0	0.56	0.6758
Zesílení stabilizačního obvodu regulátoru	K_f	p.u.	0.0635	0.05	0.108
Časová konstanta stabilizačního obvodu regulátoru	T_f	p.u.	1	1.3	0.35
1. hodnota budícího napětí	E_1	p.u.	2.88	2.5875	2.4975
Faktor sycení pro budící napětí E_1	$S_E(E_1)$	-	0	0.7298	0.0949
2. hodnota budícího napětí	E_2	p.u.	3.84	3.45	3.33
Faktor sycení pro budící napětí E_2	$S_E(E_2)$	-	0	1.3496	0.37026

Tab. B.2: Hodnoty modelu buzení [24]

Celý název	Veličina		G1	G2	G3
Maximální výkon turbíny	P_{max}	p.u.	0.8984	0.8518	1.056
Statika	R	p.u.	0.00976	0.01852	0.04
Časová konstanta regulátoru	T_1	s	0.15	0.1	0.083
Časová konstanta řídicího ventilu	T_2	s	0.05	0	0
Časová konstanta servopohonu	T_3	s	0.3	0.259	0.2
Časová konstanta nádoby s parním ventilem	T_4	s	0.26	0.1	0.05
Časová konstanta ohřevu páry	T_5	s	8	10	5
Výstup na hřídel před přihřívákem	F	p.u.	0.27	0.272	0.28

Tab. B.3: Hodnoty modelu regulátoru otáček [23]

Označení vedení ^a	Sousledná složka			Netočivá složka		
	Odpor vedení ^b	Reaktance vedení ^b	Susceptance vedení ^b	Odpor vedení ^b	Reaktance vedení ^b	Susceptance vedení ^b
	r_1	x_1	b_1	r_0	x_0	b_0
	Ω/m	Ω/m	$\text{M}\Omega\cdot\text{m}$	Ω/m	Ω/m	$\text{M}\Omega\cdot\text{m}$
45	5.288	45.091	3006.736	52.88	134.933	5007.823
46	8.994	48.804	3347.885	89.94	146.045	5584.386
57	16.932	85.407	1728.353	169.316	255.579	2878.459
69	20.684	90.182	1477.76	206.839	269.866	2462.11
78	4.494	38.194	3549.619	44.94	114.296	5912.013
89	6.292	53.472	2530.3	62.92	160.014	4215.725
^a Číselné označení představují uzly, mezi kterými se dané vedení nachází						
^b Uvedené parametry jsou přepočtené na 1 m délky vedení						

Tab. B.4: Hodnoty parametrů vedení modelu IEEE9 dle [23]

Uzel	Odebíraný činný výkon P	Odebíraný jalový výkon Q
	[MW]	[MVar]
5	125	50
6	90	30
8	100	35

Tab. B.5: Parametry modelu zatížení [23]